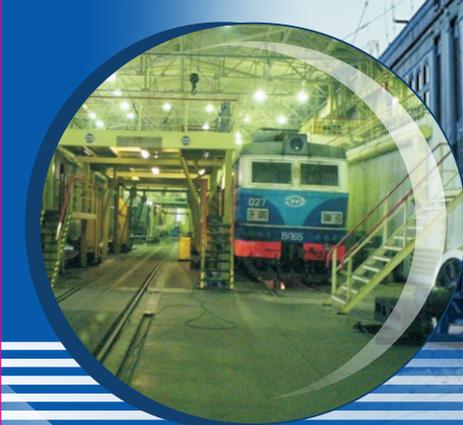


ИЗВЕСТИЯ

№ 1(17)

2014

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. **Берндт Томас** – доктор, профессор Эрфуртского университета прикладных наук, факультета бизнеса, логистики и транспорта (Эрфурт, Германия).
6. **Бирюков Виталий Васильевич** – проректор по научной работе СибАДИ, д.э.н., профессор (Омск).
7. **Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского университета (Катовицы, Польша).
9. **Каргапольцев Сергей Константинович** – проректор по научной работе ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
10. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
11. **Косых Анатолий Владимирович** – проректор по научной работе ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
12. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
13. **Наек Вячеслав** – профессор, инженер Брненского технического университета (Брно, Чехия).
14. **Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПС, д.т.н., профессор (Хабаровск).
15. **Солоненко Владимир Гельевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Вагоны» КазАТК (Алматы, Республика Казахстан).
16. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – проректор по научной работе ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
17. **Чугуй Юрий Васильевич** – директор Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).

EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
 2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
 3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
 4. **Cheremisin Vasily Titovich** – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
 5. **Berndt Thomas** – Dr., professor of University of applied sciences Erfurt, faculty of business, logistics and transport (Erfurt, Germany).
 6. **Biryukov Vitaly Vasilyevich** – vice-rector for research of SibADI, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
 7. **Bokaryov Sergey Alexandrovich** – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
 8. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of University of Silesia (Katowice, Polish).
 9. **Kargapoltsev Sergey Konstantinovich** – vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
 10. **Kosarev Alexander Borisovich** – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
 11. **Kosih Anatoly Vladimirovich** – vice-rector for research of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
 12. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
 13. **Naek Vyacheslav** – professor, engineer of Brno University of Technology (Brno, Czech republic).
 14. **Serenko Andrey Fedorovich** – vice-rector for research of FESTU, D. Sc., professor (Khabarovsk, Russia).
 15. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – D. Sc., professor, the leader of the department «Wagons» of KazATC (Almaty, Kazakhstan).
 16. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – vice-rector for research of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
 17. **Chuguy Yuri Vasilyevich** – director of Technological design institute of scientific instrument engineering, Russian Academy of Sciences, professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Novosibirsk, Russia).
- Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В. Методика определения потерь в двух-звенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки 2
- Анисимов А. С., Золотовский М. Ю. Расчет отношения теплоемкостей рабочего тела при сгорании смесевых видов топлива в цилиндре тепловозных дизелей 8
- Дульский Е. Ю., Доценко Н. С., Лыткина Е. М. Исследование эффективности конвективного и терморрадиационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава 14
- Кузнецов В. Ф., Капустян М. Ф., Ярышева Л. В. Моделирование процесса нагрева материала колеса в режиме торможения локомотива 19
- Лыткина Е. М., Дульский Е. Ю., Худонов А. М. Основы локального метода продления ресурса изоляции электрических машин тягового подвижного состава тепловым излучением 26

Транспортная энергетика

- Авдеева К. В., Медведева А. А., Слептерева Н. К. Распределение тока и напряжения в системе трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния 30
- Ведрученко В. Р., Крайнов В. В. Неравномерность рабочего процесса и процессов топливоподдачи как диагностических параметров дизелей, работающих на разных сортах топлива 42
- Вильгельм А. С., Гутников В. И., Никифоров М. М. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения 50
- Паранин А. В., Ефимов А. В., Ефимов Д. А. Моделирование чистого контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной в статике методом конечных элементов 57

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Грицутенко С. С. Определение минимума количества операций для вычисления полинома при экстраполяции скорости и координат движущегося локомотива 67
- Митрохин В. Е., Ряполов А. В., Гаранин А. Е. Методика расчета эффективности экранирования радиоэлектронной аппаратуры при воздействии импульсных электромагнитных полей 72

Путь и искусственные сооружения

- Ланис А. Л., Цибариус Ю. А. Совершенствование методики учета временной набрызгбетонной крепи в расчетах напряженного состояния конструкций тоннельных обделок 78

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Ахмедов Р. Р. Актуальность исследования проблемы оптимизации грузооборота портов Балтийского моря в условиях модернизации транспортного комплекса 84
- Либерман Я. Л., Горбунова Л. Н. Автоматизированная система позиционирования внутризаводского рельсового транспорта 89
- Лунев С. А., Сероштанов С. С., Соколов М. М., Ходкевич А. Г. Применение аппарата конформных отображений для непрерывного контроля координаты подвижной единицы на пути 94
- Минжасаров М. Х. Краткий анализ особенностей железнодорожных экипажей с нелинейными упругими элементами 99
- Фролов В. Ф., Начигин В. А. Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса 109

Организация производства на транспорте

- Аксенов В. А., Завьялов А. М. Модель оценки влияния человека на функционирование человеко-машинных систем 116

АННОТАЦИИ 120

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

В. Д. АВИЛОВ, Д. И. ПОПОВ, А. В. ЛИТВИНОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ДВУХЗВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Приведена методика определения потерь в основных элементах двухзвенных преобразователей частоты (выпрямителе и инверторе), которая позволяет дополнить математическую модель процесса испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки и использовать ее при проектировании испытательных станций, в том числе для расчета мощности станции, потребляемой из сети. Практической ценностью данной методики является отсутствие необходимости использования приборов для измерения мощности переменного тока с частотой, отличной от 50 Гц.

В настоящее время в связи с широким внедрением асинхронных двигателей на тягу (в том числе на подвижном составе железных дорог) актуальны вопросы исследования и внедрения новых энергоэффективных методов и средств диагностирования асинхронных двигателей. Существует множество методов и схем испытания электрических машин. Особый интерес представляют энергоэффективные методы и схемы, позволяющие добиться экономии электроэнергии при испытании. К таким решениям относят метод взаимной нагрузки.

Одна из схем, реализующих метод взаимной нагрузки при испытании асинхронных двигателей, предложена сотрудниками кафедр «Электрические машины и общая электротехника» и «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения [1].

В составе схемы предусмотрено использование двух однотипных преобразователей частоты, осуществляющих двойное преобразование энергии: напряжение промышленной частоты, подведенное из сети, выпрямляется, а затем инвертируется в переменное напряжение заданной частоты, подаваемое на обмотки статора двух однотипных асинхронных электродвигателей (рисунок 1). Режим взаимной нагрузки осуществляется за счет установки разных частот переменного напряжения на выходе частотных преобразователей. Машина, на которую подается напряжение большей частоты, работает в двигательном режиме, а другая – в генераторном. Вырабатываемая генератором электрическая энергия передается через обратные диоды инвертора в звено постоянного тока. Звенья постоянного тока, находящиеся между выпрямителями и инверторами частотных преобразователей, объединены в одну систему общей шиной постоянного тока. Таким образом, вырабатываемая генератором электрическая энергия передается двигателю по цепи постоянного тока, не возвращаясь в трехфазную сеть.

Особенностью преобразователей частоты, работающих в данной схеме взаимной нагрузки, является использование неуправляемых выпрямителей, что делает систему более простой и дешевой, а также менее энергоемкой, чем при использовании управляемых выпрямителей [2].

Энергия, потребляемая из сети всей установкой, необходима для компенсации потерь во всех частях схемы: асинхронных двигателях, частотных преобразователях и др. [3, 4].

Для приведенной схемы была разработана математическая модель, которая позволяет оценить энергоемкость метода взаимной нагрузки при испытании асинхронных двигателей. Математическая модель имеет вид системы из 13 дифференциальных уравнений:

первые шесть уравнений описывают электромагнитные процессы, происходящие в первой электрической машине;

другие шесть уравнений описывают электромагнитные процессы, происходящие во второй электрической машине;

одно уравнение системы определяет связь электромагнитных моментов обеих машин и частоты совместного вращения их механически соединенных роторов.

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в одной электрической машине, приведена в работе [5]. Однако данная математическая модель не учитывает потери в основных элементах преобразователей частоты: выпрямителе и инверторе [3].

Для оценки потерь в двухзвенных преобразователях частоты при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки разработана физическая модель [6, 7].

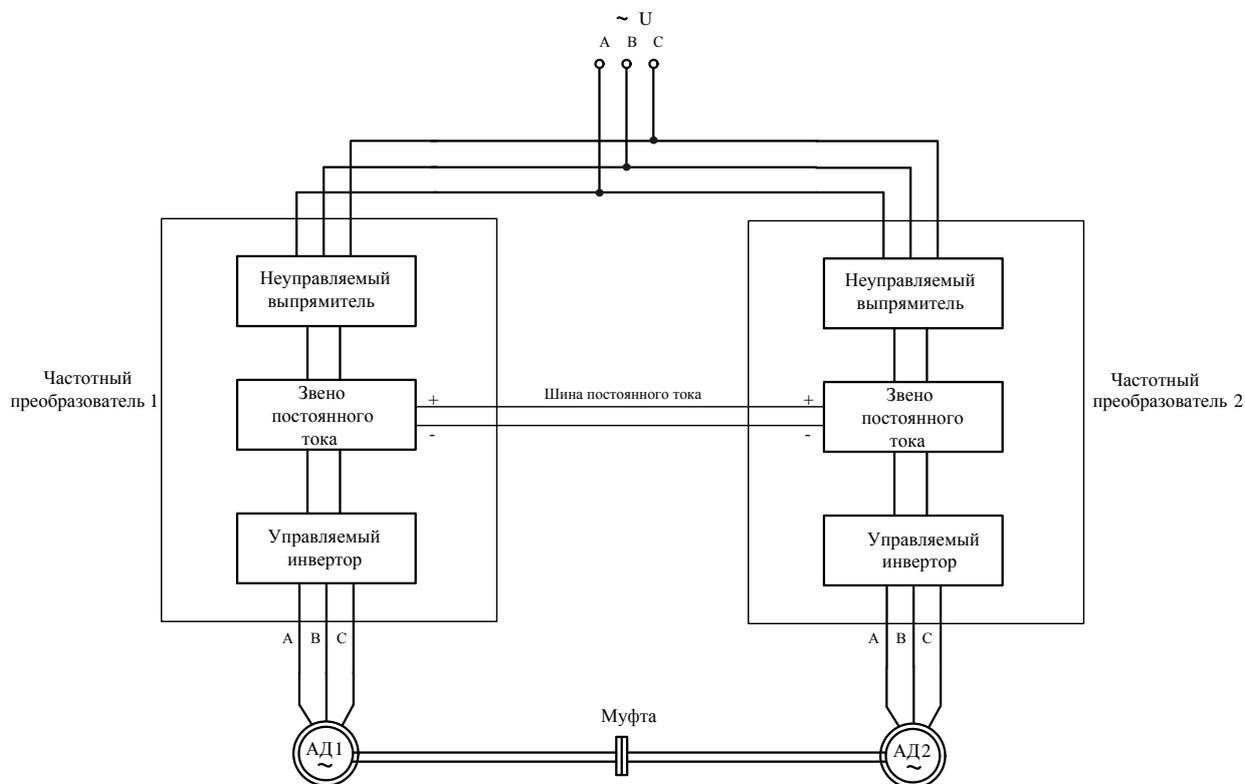


Рисунок 1 – Структурная схема для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки

Структурная схема физической модели приведена на рисунке 2.

В процессе работы физической модели фиксируются следующие параметры:

подаваемые из сети напряжение, ток, мощность (активная, реактивная, полная), коэффициент мощности по фазам, их средние значения по каждой фазе и суммарные показатели по трем фазам (измерения проводятся тремя цифровыми измерительными многофункциональными приборами ЦМ120);

ток и напряжение в общей шине постоянного тока для определения величины передаваемой по ней мощности в процессе взаимной нагрузки (измерения проводятся амперметром и вольтметром постоянного тока Щ120П);

ток, напряжение и мощность на выходе преобразователя частоты (измерения проводятся анализатором качества электрической энергии AR-5).

Все электроизмерительные приборы, используемые в физической модели, входят в Государственный реестр средств измерений.

Как правило, для определения потерь в узле электрической цепи необходимо измерить мощность, входящую в данный узел, мощность, выходящую из узла, и найти их разность. Однако на практике в схеме с инверторами может возникнуть сложность с измерением электрической мощности при токе с частотой, отличающейся от промышленной, так как большинство электроизмерительных приборов рассчитано на измерения именно на частоте, равной 50 Гц.

Оценку потерь в преобразователях частоты с учетом особенностей схемы, приведенной на рисунке 1, предлагается проводить с использованием методики, основная идея которой

состоит в поэтапной перекоммутации схемы испытаний и проведении ряда измерений и расчетов, что наглядно можно увидеть на рисунках 3, 4 и 6 с пояснениями.

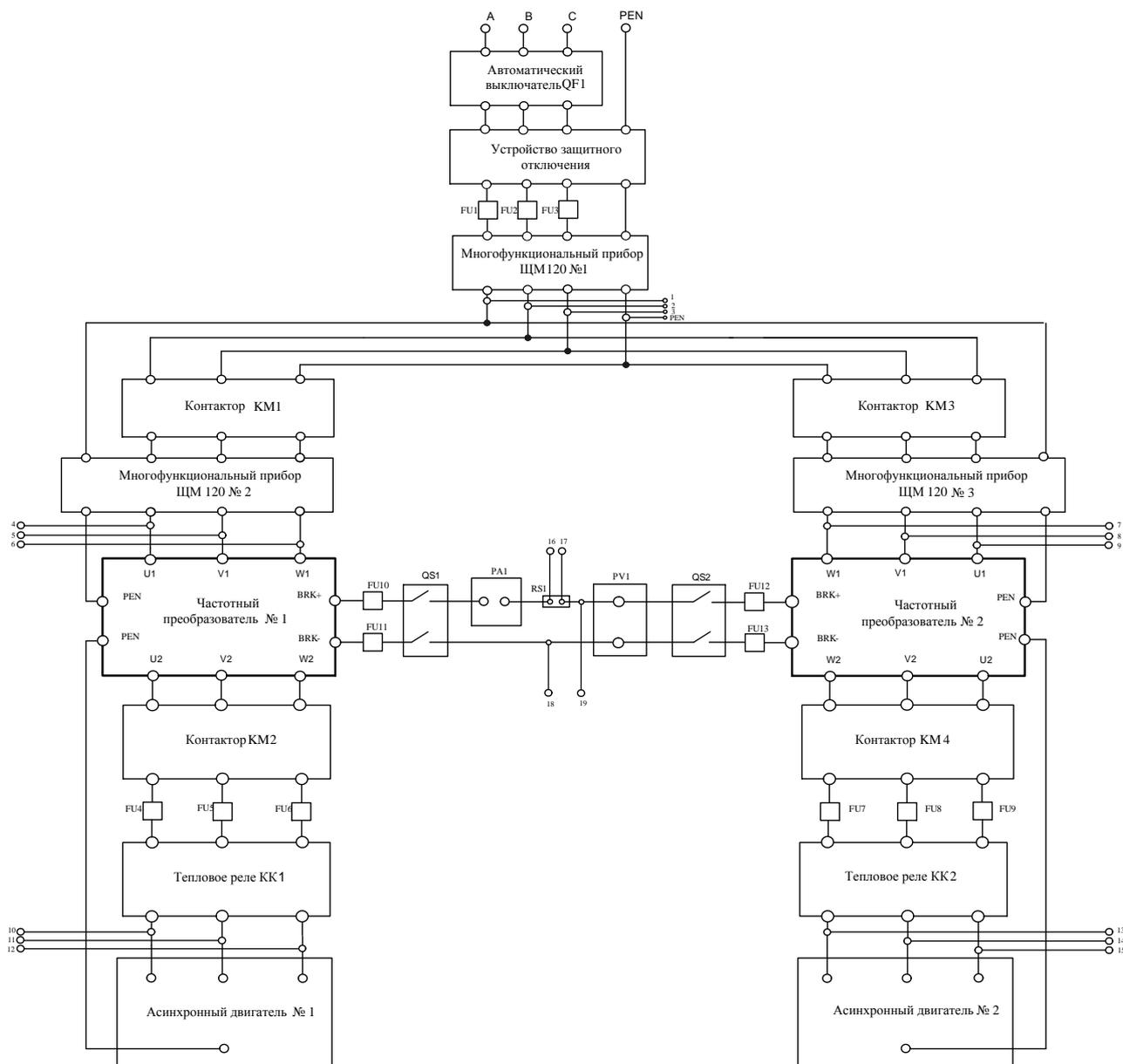


Рисунок 2 – Структурная схема стенда для испытания асинхронных двигателей

Для определения потерь в режиме холостого хода собирается схема, представленная на рисунке 3.

Эксперимент проводится при замкнутых контакторах KM1, KM4 (см. рисунок 2), что обеспечивает подвод электрической энергии через выпрямитель первого частотного преобразователя, общую шину постоянного тока и инвертор второго частотного преобразователя к испытуемому двигателю АД2. Измерения проводятся со стороны сети, в общей шине постоянного тока и со стороны двигателя АД2:

W_c – активная мощность, потребляемая из трехфазной сети;

$P_{ШПТ}$ – мощность, передаваемая по общей шине постоянного тока;

W_d – активная мощность, подаваемая на испытуемый двигатель.

Потери в выпрямителе определяются разностью мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока, и мощности, потребляемой из трехфазной сети:

$$\Delta P_{\text{выпр. х. х}} = P_{\text{ШПТ. х. х}} - W_{c. х. х} \quad (1)$$

Потери в инверторе определяются как разность мощности, потребляемой испытуемым двигателем, и мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{инв. х. х}} = P_{\text{ШПТ. х. х}} - W_{\text{д. х. х}} \quad (2)$$

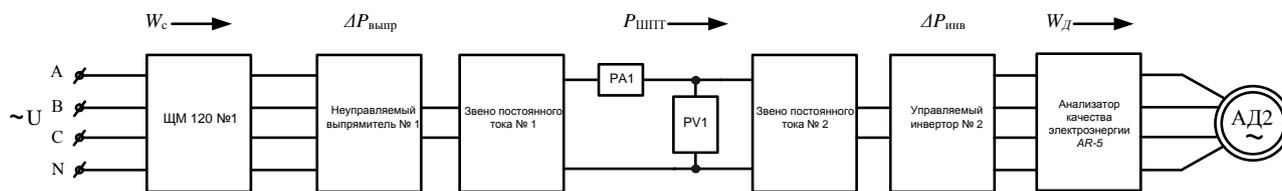


Рисунок 3 – Схема для определения потерь в режиме холостого хода

Определение потерь в выпрямителе и инверторе преобразователя частоты при проведении испытаний в режиме взаимной нагрузки для принятой схемы стенда (см. рисунок 2) проводится в три этапа.

На первом этапе собирается схема, приведенная на рисунке 4.

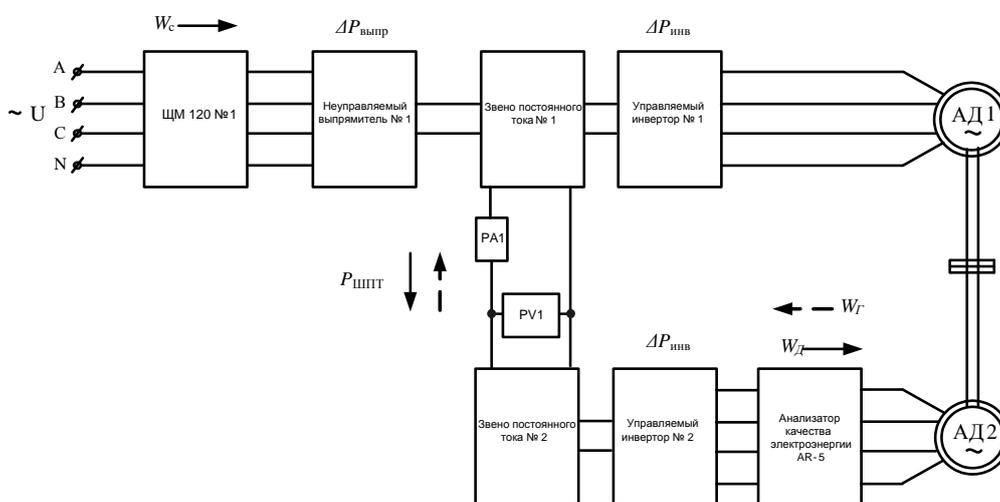


Рисунок 4 – Схема для определения потерь в управляемом инверторе в режиме взаимной нагрузки

И проводятся измерения в следующей последовательности:

подключается анализатор качества электрической энергии АР-5 к фазам двигателя АД2; подается питание из сети на выпрямитель первого преобразователя: осуществляется запуск обеих машин на холостом ходу при частоте питающего напряжения 50 Гц;

на двигателе АД2 устанавливается неизменной частота питающего напряжения 50 Гц и уменьшается частота питающего напряжения на первой машине АД1 ниже 50 Гц, тем самым АД1 нагружается в режиме генератора, а АД2 – в режиме двигателя;

проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока, и мощности, подаваемой на двигатель от управляемого инвертора;

определяется зависимость потерь в управляемом инверторе при работе АД2 в режиме двигателя как разность мощности, потребляемой испытуемой электрической машиной, и мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{инв}}(W_{\text{д}}) = P_{\text{ШПТ}}(W_{\text{д}}) - W_{\text{д}}; \quad (3)$$

на двигателе АД2 устанавливается неизменной частота питающего напряжения 50 Гц и увеличивается частота питающего напряжения на первой машине АД1 вверх от 50 Гц, тем самым АД1 нагружается в режиме двигателя, а АД2 – в режиме генератора;

проводятся измерения мощности, передаваемой через шину постоянного тока, и мощности, вырабатываемой генератором, которая передается через обратные диоды управляемого инвертора в звено постоянного тока;

определяется зависимость потерь в управляемом инверторе при работе АД2 в режиме генератора как разность мощности, генерируемой испытуемой электрической машиной, и мощности, передаваемой по общей шине постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{инв}} (W_{\Gamma}) = W_{\Gamma} - P_{\text{ШПТ}} (W_{\Gamma}). \quad (4)$$

Потери в управляемом инверторе, входящем в состав физической модели, определенные по данной методике, представлены на рисунке 5.

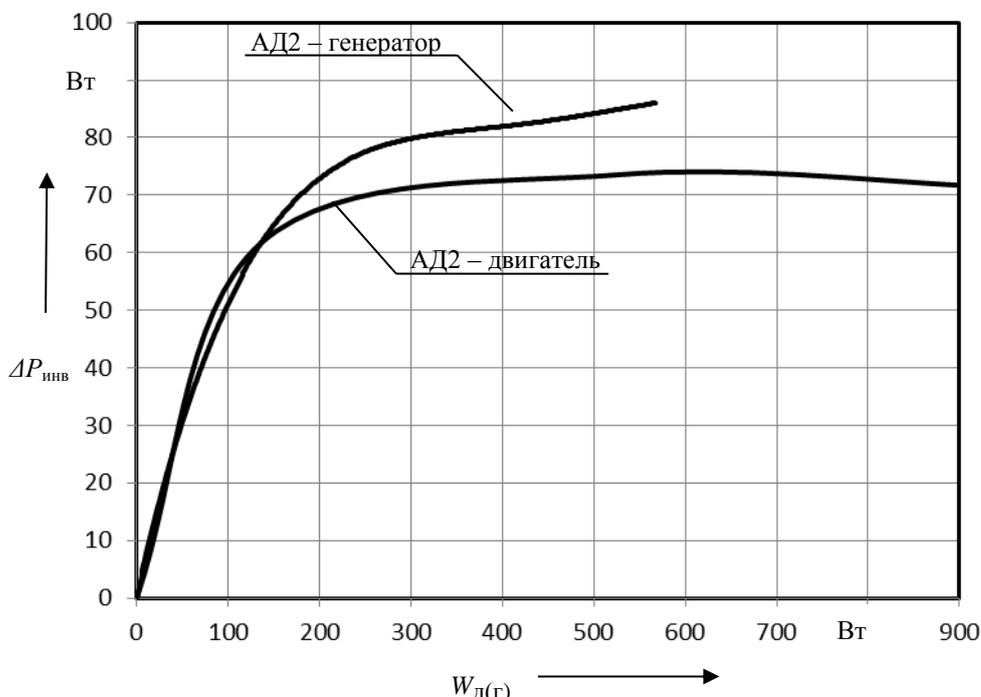


Рисунок 5 – Зависимости потерь в инверторе от мощности, потребляемой двигателем (вырабатываемой генератором)

На втором этапе методики определяются потери в неуправляемом выпрямителе.

Измерения на втором этапе проводятся по схеме, приведенной на рисунке 6, отличие которой состоит в том, что к сети подключены оба неуправляемых выпрямителя и электрическая энергия от сети в звенья постоянного тока передается по ним обоим одновременно. Измерения проводятся при тех же режимах работы асинхронных машин, что и на первом этапе.

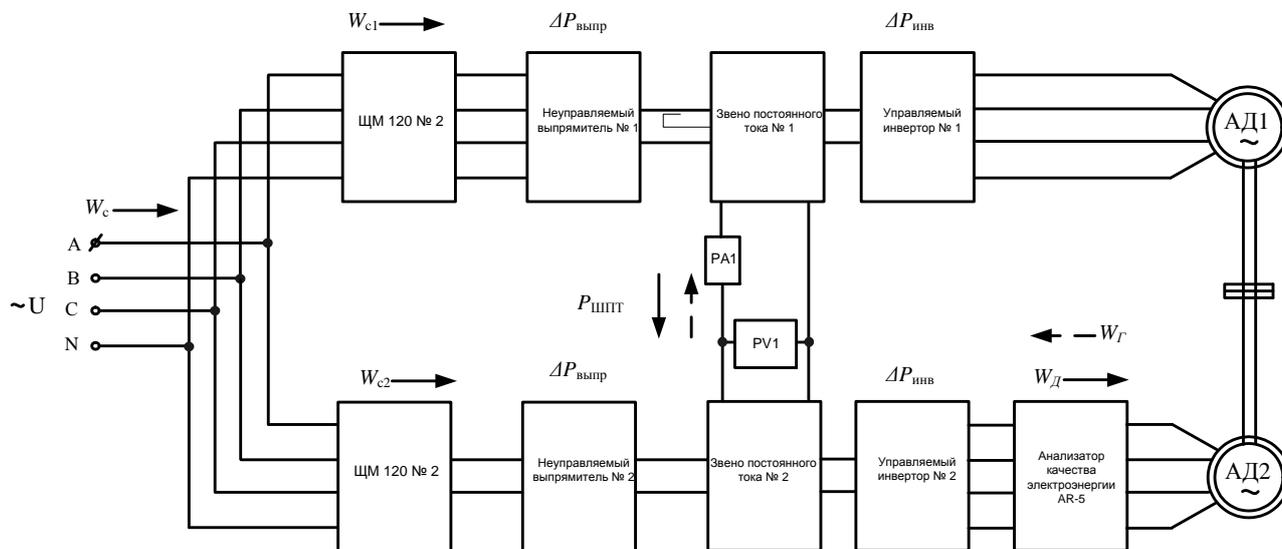


Рисунок 6 – Схема для определения потерь в преобразователе частоты в режиме взаимной нагрузки

Проведенные измерения позволяют определить полные потери в частотных преобразователях в режиме взаимной нагрузки для второго частотного преобразователя: при работе АД2 в режиме двигателя –

$$\Delta P_{\text{чп}}(W_{\text{д}}) = W_{\text{с2}}(W_{\text{д}}) + P_{\text{шпт}}(W_{\text{д}}) - W_{\text{д}}; \quad (5)$$

при работе АД2 в режиме генератора –

$$\Delta P_{\text{чп}}(W_{\text{г}}) = W_{\text{с2}}(W_{\text{г}}) - P_{\text{шпт}}(W_{\text{г}}) + W_{\text{г}}. \quad (6)$$

Составляющие $W_{\text{с2}}$, $W_{\text{г}}$, $W_{\text{д}}$, $P_{\text{шпт}}$ получены по результатам измерений, а $\Delta P_{\text{инв}}$ можно определить по рисунку 5 в зависимости от режима работы двигателя АД2.

На третьем, заключительном этапе определяются потери в неуправляемом выпрямителе второго частотного преобразователя как разность между общими потерями в частотном преобразователе, которые найдены по выражениям (5) и (6), и потерями в управляемом инверторе, которые определены по выражениям (3) и (4):

$$\Delta P_{\text{выпр}}(W_{\text{д}}) = \Delta P_{\text{чп2}}(W_{\text{д}}) - \Delta P_{\text{инв}}(W_{\text{д}}); \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{выпр}}(W_{\text{г}}) = \Delta P_{\text{чп2}}(W_{\text{г}}) - \Delta P_{\text{инв}}(W_{\text{г}}). \quad (8)$$

Разработанная методика позволяет определять потери в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки при различных режимах работы.

Практическая ценность представленной методики заключается в том, что все измерения требуют применения измерительных приборов, рассчитанных на промышленную частоту сети переменного тока 50 Гц, что значительно упрощает измерения потерь мощности в узлах схемы.

Результаты применения данной методики дополняют математическую модель, описывающую работу асинхронных двигателей при испытании их методом взаимной нагрузки, что позволяет определять необходимую мощность питающей сети при проектировании соответствующего испытательного стенда.

Список литературы

1. Пат. 2433419 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ испытаний асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / Авилов В. Д., Володин А. И., Данковцев В. Т., Лукьянченко В. В., Панькин Е. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2010124307/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. – 5 с.: ил.
2. Пат. 80018 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/04. Устройство для испытания тяговых электродвигателей [Текст] / Бейерлейн Е. В., Рапопорт О. Л., Цукублин А.Б.; заявитель и патентообладатель Томский политехнич. ун-т. – № 2008115647/22; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 6 с.: ил.
3. Авилов, В. Д. Математическая модель процесса испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Вестник СибАДИ / Сибирская автомобильно-дорожная акад. – Омск, 2013. – № 5 (33). – С. 75 – 81.
4. Авилов, В. Д. Оценка энергетической эффективности применения метода взаимной нагрузки при испытании асинхронных тяговых двигателей [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 3 (1). – С. 2 – 7.
5. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока [Текст] / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
6. Физическая модель испытательной станции асинхронных тяговых двигателей с использованием метода взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, В. Т. Данковцев и др. // Ин-

новационные проекты и новые технологии для транспортного комплекса: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 69 – 73.

7. Модернизированный стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, В. Т. Данковцев и др. // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: Материалы IX междунар. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 137 – 141.

УДК 621.436

А. С. Анисимов, М. Ю. Золотовский

РАСЧЕТ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРИ СГОРАНИИ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЕ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В статье представлена методика расчета отношения теплоемкостей рабочего тела, образовавшегося в процессе сгорания топлива. Представлены аналитические зависимости отношения теплоемкостей в зависимости от температуры продуктов сгорания, коэффициента избытка воздуха и доли сгоревшего топлива для различных составов смесевых видов углеводородного топлива.

При выполнении расчета процесса сгорания топлива в цилиндре тепловозного дизеля методом Вибе, методика которого представлена в работах [1, 2], для расчета текущего значения давления продуктов сгорания по углу поворота коленчатого вала используется уравнение:

$$P_2 = \frac{\varepsilon q_z \Delta x_{1-2} + P_1 (K_{1-2} v_1 - v_2)}{K_{1-2} v_2 - v_1}, \quad (1)$$

где ε – геометрическая степень сжатия дизеля;

q_z – общая удельная использованная теплота сгорания;

Δx_{1-2} – доля топлива, сгоревшего на элементарном участке процесса сгорания топлива;

P_1 – давление продуктов сгорания в начале рассматриваемого элементарного участка процесса сгорания топлива;

v_1, v_2 – удельный объем продуктов сгорания в начале и конце элементарного участка процесса сгорания топлива;

$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1}$ – средняя величина фактора теплоемкости рабочего тела;

$k_{1-2} - 1 = \frac{c_{p_{1-2}}}{c_{v_{1-2}}}$ – отношение средних теплоемкостей на элементарном участке процесса сгорания топлива.

При выполнении расчета процесса сгорания топлива отношение теплоемкостей рабочего тела k следует определять по температуре, коэффициенту избытка воздуха и доле сгоревшего топлива. Применение для этой цели приближенных формул В. Шюле [3] ограничено линейной зависимостью отношения теплоемкости k от температуры. К тому же, формулы В. Шюле не учитывают влияние на отношение теплоемкости k коэффициента избытка воздуха и доли сгоревшего топлива.

Состав рабочего тела в процессе сгорания меняется от воздуха в начале процесса сгорания до соответствующих избытку воздуха продуктов сгорания топлива в конце процесса сгорания. В общем виде формула отношения теплоемкостей для любого промежуточного состояния рабочего тела будет иметь вид [3]:

$$k = k_b - (k_b - k_r)x, \quad (2)$$

где k_b, k_r – отношение теплоемкостей для воздуха и продуктов сгорания.

В работе [3] показано, что для продуктов сгорания дизельного топлива и воздуха уравнение (2) переписывается в виде:

$$k = a + \frac{b}{T} - (a - a_\alpha)x, \quad (3)$$

где a и b – константы прямой для воздуха;

a_α – ордината, отсекаемая прямой, соответствующей данному коэффициенту избытка воздуха, на оси ординат.

Константы a и b получены в результате проверки гиперболической зависимости значения k от температуры, перестроенные в функции $1/T$. Аналогичным образом получено значение a_α в зависимости от обратной величины коэффициента избытка воздуха, для которой получено уравнение:

$$a_\alpha = a_1 - \frac{b_1}{\alpha}. \quad (4)$$

Окончательно уравнение (3) принимает вид:

$$k = a + \frac{b}{T} - \left(a - a_1 + \frac{b_1}{\alpha} \right) x. \quad (5)$$

Для дизельного топлива среднего элементарного состава ($C = 0,845$; $H = 0,136$; $O = 0,012$; $S = 0,007$) были вычислены истинные изохорные мольные теплоемкости продуктов полного сгорания топлива μ_{sv} для шести значений коэффициента избытка воздуха. Численные значения μ_{sv} продуктов сгорания и воздуха представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость истинных изохорных теплоемкостей продуктов полного сгорания дизельного топлива и воздуха от температуры и коэффициента избытка воздуха, кДж/(моль·К)

Температура T, K	Коэффициент избытка воздуха α						Воздух
	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	
1	2	3	4	5	6	7	8
273	22,2000	21,9232	21,7346	21,5978	21,4941	21,4128	20,7360
323	22,5426	22,2143	21,9906	21,8284	21,7054	21,6089	20,8090
373	22,9032	22,5312	22,2777	22,0939	21,9545	21,8452	20,9410
423	23,2861	22,8768	22,5980	22,3958	22,2424	22,1221	21,1280
473	23,6927	23,2524	22,9525	22,7350	22,5700	22,4406	21,3630
523	24,1205	23,6506	23,3305	23,0984	22,9223	22,7842	21,6380
573	24,5651	24,0697	23,7322	23,4875	23,3019	23,1563	21,9460
623	25,0216	24,5028	24,1493	23,8930	23,6986	23,5461	22,3060
673	25,4840	24,9431	24,5746	24,3074	24,1048	23,9458	22,6190
723	25,9459	25,3840	25,0012	24,7235	24,5130	24,3479	22,9680
773	26,4021	25,8199	25,4231	25,1354	24,9173	24,7461	23,3160
823	26,8466	26,2445	25,8342	25,5366	25,3110	25,1340	23,6580
873	27,2769	26,6552	26,2315	25,9243	25,6914	25,5086	23,9870
923	27,6895	27,0485	26,6118	26,2951	26,0550	25,8666	24,3010
973	28,0830	27,4231	26,9735	26,6475	26,4002	26,2063	24,5980
1023	28,4559	27,7774	27,3151	26,9799	26,7257	26,5263	24,8760
1073	28,8110	28,1142	27,6393	27,2950	27,0339	26,8290	25,1350

Подвижной состав железных дорог

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
1123	29,1441	28,4297	27,9430	27,5900	27,3223	27,1123	25,3760
1173	29,4601	28,7286	28,2301	27,8687	27,5946	27,3795	25,6000
1223	29,7592	29,0111	28,5013	28,1316	27,8513	27,6313	25,8090
1273	30,0427	29,2785	28,7578	28,3802	28,0939	27,8693	26,0040
1323	30,3114	29,5318	29,0007	28,6155	28,3234	28,0943	26,1870
1373	30,5669	29,7727	29,2315	28,8391	28,5415	28,3080	26,3590
1423	30,8083	30,0001	29,4493	29,0500	28,7471	28,5095	26,5230
1473	31,0358	30,2142	29,6543	29,2484	28,9405	28,6990	26,6790
1523	31,2302	30,3996	29,8337	29,4233	29,1120	28,8679	26,8260
1573	31,4306	30,5880	30,0139	29,5975	29,2818	29,0341	26,9680
1623	31,6177	30,7639	30,1821	29,7602	29,4403	29,1893	27,1010
1673	31,7936	30,9294	30,3405	29,9135	29,5897	29,3357	27,2260
1723	31,9616	31,0879	30,4925	30,0608	29,7334	29,4766	27,3440
1773	32,1288	31,2466	30,6455	30,2096	29,8791	29,6198	27,4540

Далее были вычислены отношения теплоемкостей k продуктов полного сгорания топлива и воздуха для тех же значений α . Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость отношения теплоемкостей k продуктов полного сгорания дизельного топлива и воздуха от температуры и коэффициента избытка воздуха

Температура T, K	Коэффициент избытка воздуха α						Воздух
	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	
1	2	3	4	5	6	7	8
273	1,3745	1,3792	1,3825	1,3850	1,3868	1,3883	1,4010
323	1,3688	1,3743	1,3781	1,3809	1,3830	1,3848	1,3995
373	1,3630	1,3690	1,3732	1,3763	1,3787	1,3806	1,3970
423	1,3570	1,3634	1,3679	1,3712	1,3738	1,3758	1,3935
473	1,3509	1,3576	1,3622	1,3657	1,3684	1,3705	1,3892
523	1,3447	1,3515	1,3564	1,3599	1,3627	1,3649	1,3842
573	1,3385	1,3454	1,3503	1,3540	1,3568	1,3590	1,3788
623	1,3323	1,3393	1,3443	1,3480	1,3508	1,3531	1,3727
673	1,3263	1,3333	1,3383	1,3420	1,3449	1,3472	1,3676
723	1,3204	1,3275	1,3326	1,3363	1,3392	1,3415	1,3620
773	1,3149	1,3220	1,3270	1,3308	1,3337	1,3360	1,3566
823	1,3097	1,3168	1,3218	1,3256	1,3285	1,3308	1,3514
873	1,3048	1,3119	1,3170	1,3207	1,3236	1,3259	1,3466
923	1,3003	1,3074	1,3124	1,3162	1,3191	1,3214	1,3421
973	1,2961	1,3032	1,3082	1,3120	1,3149	1,3173	1,3380
1023	1,2922	1,2993	1,3044	1,3082	1,3111	1,3134	1,3342
1073	1,2886	1,2957	1,3008	1,3046	1,3075	1,3099	1,3308
1123	1,2853	1,2924	1,2975	1,3013	1,3043	1,3067	1,3276
1173	1,2822	1,2894	1,2945	1,2983	1,3013	1,3037	1,3248
1223	1,2794	1,2866	1,2917	1,2955	1,2985	1,3009	1,3221
1273	1,2767	1,2840	1,2891	1,2930	1,2959	1,2983	1,3197
1323	1,2743	1,2815	1,2867	1,2905	1,2935	1,2959	1,3175
1373	1,2720	1,2793	1,2844	1,2883	1,2913	1,2937	1,3154

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
1423	1,2699	1,2771	1,2823	1,2862	1,2892	1,2916	1,3135
1473	1,2679	1,2752	1,2804	1,2843	1,2873	1,2897	1,3116
1523	1,2662	1,2735	1,2787	1,2826	1,2856	1,2880	1,3099
1573	1,2645	1,2718	1,2770	1,2809	1,2839	1,2864	1,3083
1623	1,2630	1,2703	1,2755	1,2794	1,2824	1,2848	1,3068
1673	1,2615	1,2688	1,2740	1,2779	1,2810	1,2834	1,3054
1723	1,2601	1,2674	1,2727	1,2766	1,2796	1,2821	1,3041
1773	1,2588	1,2661	1,2713	1,2752	1,2783	1,2807	1,3028

На рисунке 1 представлены зависимости k в функции $1/T$, значения которой в широких пределах температуры хорошо укладываются в параллельные прямые линии.

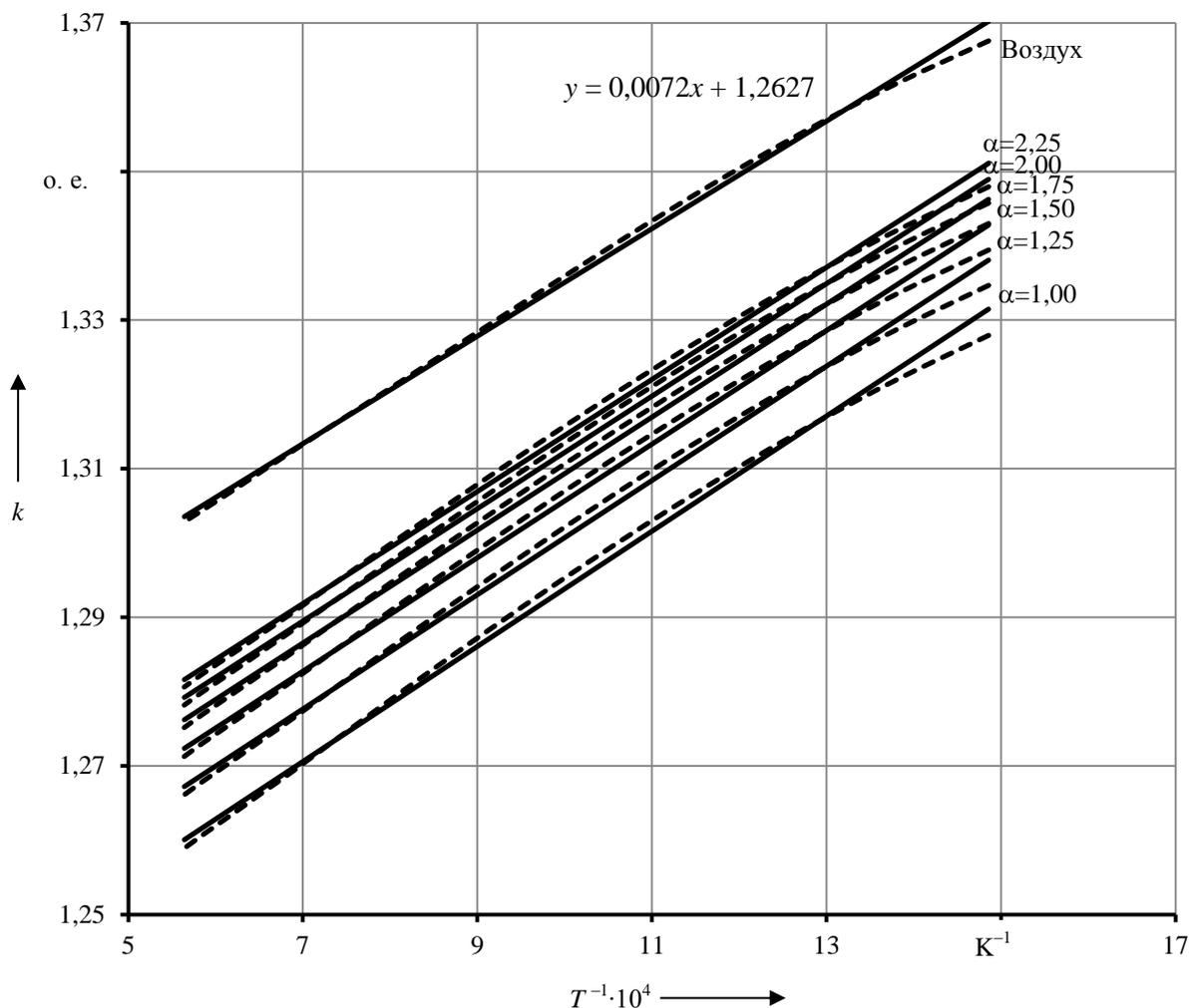


Рисунок 1 – Зависимости отношения теплоемкостей k продуктов полного сгорания дизельного топлива и воздуха для разных значений α

Значения a_α в зависимости от обратной величины коэффициента избытка воздуха $1/\alpha$ представлены на рисунке 2. Точки этой зависимости хорошо ложатся на прямую линию.

Подставляя численные значения коэффициентов уравнений прямых линий, представленных на рисунках 1 и 2, получаем в окончательном виде эмпирическое уравнение для продуктов сгорания дизельного топлива

$$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0055 - \frac{0,0405}{\alpha}\right)x. \quad (6)$$

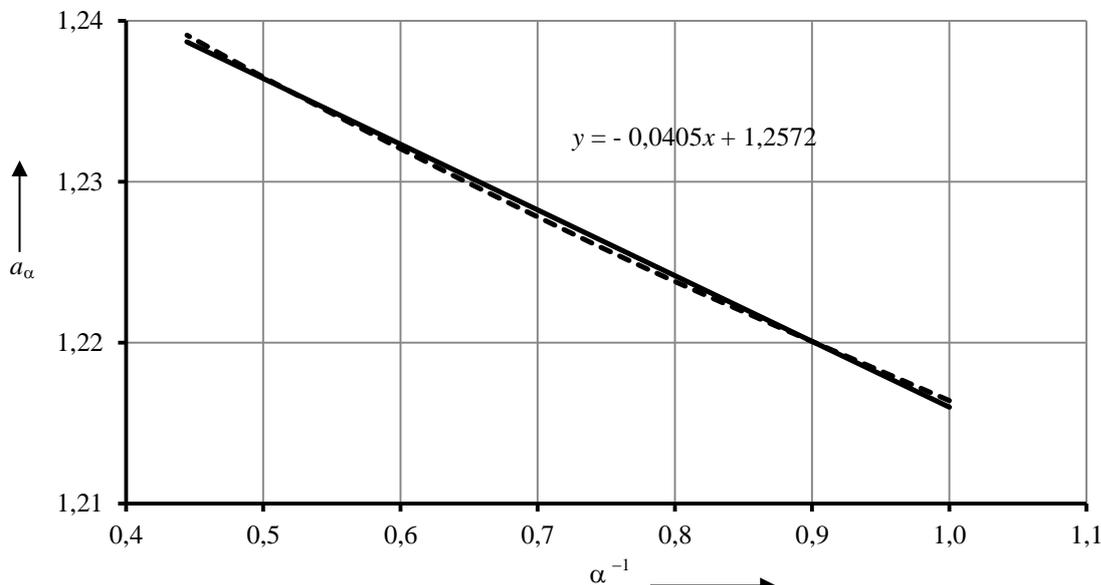


Рисунок 2 – График уравнения (4) для продуктов полного сгорания дизельного топлива

Для конечных продуктов сгорания дизельного топлива уравнение (6) принимает вид:

$$k = 1,2572 + \frac{72}{T} - \frac{0,0405}{\alpha}. \quad (7)$$

Проверка уравнения (6) показала, что точность определения отношения теплоемкостей k по сравнению с данными таблицы 2 в пределах изменения температуры 700 – 1800 К составляет около $\pm 0,3\%$.

В случае применения смесового топлива расчетное уравнение для k следует определять с учетом доли присадки альтернативного топлива к дизельному, которая влияет на элементарный состав смесового топлива.

Элементарный состав смесового топлива рассчитаем с применением следующих выражений:

$$C^{(см)} = (1-d)C^{(ДТ)} + dC^{(d)}; \quad (8)$$

$$H^{(см)} = (1-d)H^{(ДТ)} + dH^{(d)}; \quad (9)$$

$$O^{(см)} = (1-d)O^{(ДТ)} + dO^{(d)}; \quad (10)$$

$$S^{(см)} = (1-d)S^{(ДТ)} + dS^{(d)}, \quad (11)$$

где $C^{(ДТ)}$, $H^{(ДТ)}$, $O^{(ДТ)}$, $S^{(ДТ)}$ – элементарный состав дизельного топлива;

$C^{(d)}$, $H^{(d)}$, $O^{(d)}$, $S^{(d)}$ – элементарный состав альтернативной добавки.

Элементарный состав для представленных выше альтернативных добавок приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Элементарный состав альтернативных добавок

Наименование альтернативной добавки и ее природный состав	Элементарный состав альтернативной добавки			
	C ^(d)	H ^(d)	O ^(d)	S ^(d)
Природный газ ПГ состава – метан 100 %	0,75	0,25	–	–
Биотопливо БТ1 состава – метан – 87 %, углекислый газ – 13 %	0,688	0,218	0,094	–
Биотопливо БТ2 состава – метан – 50 %, углекислый газ – 50 %	0,512	0,125	0,363	–

На основе расчета по приведенной выше методике определения уравнений для расчета величины отношения теплоемкостей продуктов сгорания в таблице 4 представлены коэффициенты регрессии уравнения (4) и вид уравнения (5) для различных долей альтернативной добавки.

Таблица 4 – Значение коэффициентов регрессии уравнения (4) и вид уравнения (5) для различных долей альтернативной добавки

Доля альтернативной добавки, %	Коэффициенты регрессии уравнения (4)		Вид уравнения (5)
	a ₁	b ₁	
Природный газ ПГ			
10	1,2572	– 0,0407	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0055 - \frac{0,0407}{\alpha}\right)x$
20	1,2570	– 0,0407	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0057 - \frac{0,0407}{\alpha}\right)x$
30	1,2570	– 0,0408	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0057 - \frac{0,0408}{\alpha}\right)x$
40	1,2568	– 0,0408	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0059 - \frac{0,0408}{\alpha}\right)x$
Биотопливо БТ1			
10	1,2571	– 0,0407	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0056 - \frac{0,0407}{\alpha}\right)x$
20	1,2570	– 0,0408	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0057 - \frac{0,0408}{\alpha}\right)x$
30	1,2568	– 0,0408	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0059 - \frac{0,0408}{\alpha}\right)x$
40	1,2568	– 0,0411	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0059 - \frac{0,0411}{\alpha}\right)x$
Биотопливо БТ2			
10	1,2570	– 0,0407	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0057 - \frac{0,0407}{\alpha}\right)x$
20	1,2569	– 0,0411	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0058 - \frac{0,0411}{\alpha}\right)x$
30	1,2566	– 0,0412	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0061 - \frac{0,0412}{\alpha}\right)x$
40	1,2565	– 0,0416	$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0062 - \frac{0,0416}{\alpha}\right)x$

В диапазоне изменения доли альтернативной добавки от 0 до 40 % в смесевом топливе расхождение коэффициента a₁ составляет не более 0,03 %, b₁ – около 2 %.

С учетом средних значений a₁ и b₁ окончательно принимаем вид уравнения (5):
для продуктов сгорания дизельного топлива и природного газа ПГ –

$$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0057 - \frac{0,04075}{\alpha} \right) x; \quad (12)$$

для продуктов сгорания дизельного топлива и биотоплива БТ1 –

$$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0058 - \frac{0,04085}{\alpha} \right) x; \quad (13)$$

для продуктов сгорания дизельного топлива и биотоплива БТ2 –

$$k = 1,2627 + \frac{72}{T} - \left(0,0059 - \frac{0,0412}{\alpha} \right) x. \quad (14)$$

Таким образом, полученные уравнения для определения отношения теплоемкостей продуктов сгорания позволяют уточнить расчет процесса сгорания при моделировании рабочего цикла тепловозных дизелей. При этом повышается точность определения работы газов и скорости нарастания давления и температуры рабочего тела в течение рабочего цикла.

Список литературы

1. Совершенствование метода анализа процесса сгорания по индикаторной диаграмме [Текст] / А. С. Анисимов, Е. И. Сквородников и др. // Наука и техника транспорта / Российская открытая акад. транспорта МИИТа. – М. – 2010. – № 4. – С. 57 – 63.
2. Володин, А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации: Монография [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сквородников, А. С. Анисимов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 166 с.
3. Вибе, И. И. Новое о рабочем цикле двигателей [Текст] / И. И. Вибе. – М.; Свердловск: Машгиз, 1962. – 271 с.

УДК 621.33

Е. Ю. Дульский, Н. С. Доценко, Е. М. Лыткина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО И ТЕРМОРАДИАЦИОННОГО МЕТОДОВ КАПСУЛИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПРИ РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Статья посвящена исследованию эффективности использования терморadiaционного и конвективного методов сушки изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава, пропитанной различными современными лаками и компаундами, при их депоовском и заводском ремонте. Объективными факторами при сравнении методов являются такие параметры, как класс нагревостойкости, электрическая прочность и цементирующая способность. Авторами обосновывается преимущество терморadiaционного метода перед конвективным.

Изоляция обмоток электрических машин тягового подвижного состава (ТПС) является наиболее уязвимым и в то же время дорогим звеном машины. В процессе изготовления электрических машин для повышения влаго-, электро- и термостойкости изоляции, а также в процессе ремонта для восстановления ее физико-механических свойств применяют пропитку

изоляции в пропиточном материале (лаке, компаунде и др.) с последующей ее сушкой различными способами.

В настоящее время на рынке электроизоляционных материалов ведущие производители в России и за рубежом предлагают новые электроизоляционные материалы и системы изоляции на их основе, в том числе и для изоляции электрических машин тягового подвижного состава (электровозов, электропоездов и тепловозов). В России к таким производителям можно отнести ЗАО «Электроизолит», ОАО «Диэлектрик», «Элинар» и др.

Узнать, какой из пропиточных материалов качественнее, представляется возможным лишь из практики его применения, что влечет за собой большие затраты, а результат не всегда бывает положительным. Помимо этого каждый пропиточный материал требует индивидуального подхода в процессе ремонта, обусловленного в основном температурными условиями при его полимеризации. В связи с этим замена пропиточного материала также приводит к необходимости реорганизации уже отработанной технологии ремонта с вытекающими из этого затратами как времени, так и денежных средств.

Основными параметрами, характеризующими качество изоляционных материалов, являются термостойкость, определяющая максимально допустимую температуру нагрева изоляции; электрическая прочность, характеризующая защищенность изоляции от электрических пробоев и межвитковых замыканий; и цементирующая способность, влияющая на неразрушимость изоляции при воздействии вибрации.

Термостойкость изоляции производители пропиточных материалов указывают в виде класса изоляции (В, F, H и т. д.), а такие параметры, как электрическая прочность и цементирующая способность, обычно остаются для потребителей не известными, но от их значений во многом зависит надежная работа электрической машины.

В связи с этим сотрудниками кафедры «Электроподвижной состав» (ЭПС) Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) предлагается методика по определению эффективности изоляционных конструкций и пропиточных материалов в процессе депоовского и заводского ремонта электрических машин ТПС, а именно сравнение различных изоляционных лент, пропитанных и закапсулированных в различных пропиточных материалах, различными методами с целью выявления лучших по таким параметрам, как электрическая прочность и цементирующая способность.

Ранее [1] в наших работах на уровне гипотезы доказывалась эффективность терморрадиационного метода сушки пропитанной изоляции обмоток электрических машин ТПС (тепловым излучением) [2, 3] в сравнении с конвективным при их депоовском и заводском ремонте. Были проведены экспериментальные исследования по сравнению эффективности данных методов для пропитанной изоляционной ленты типа ЛЭС-0,1-20 (далее – ЛЭС), применяемой в качестве покровной изоляции при изготовлении и ремонте тягового элек-

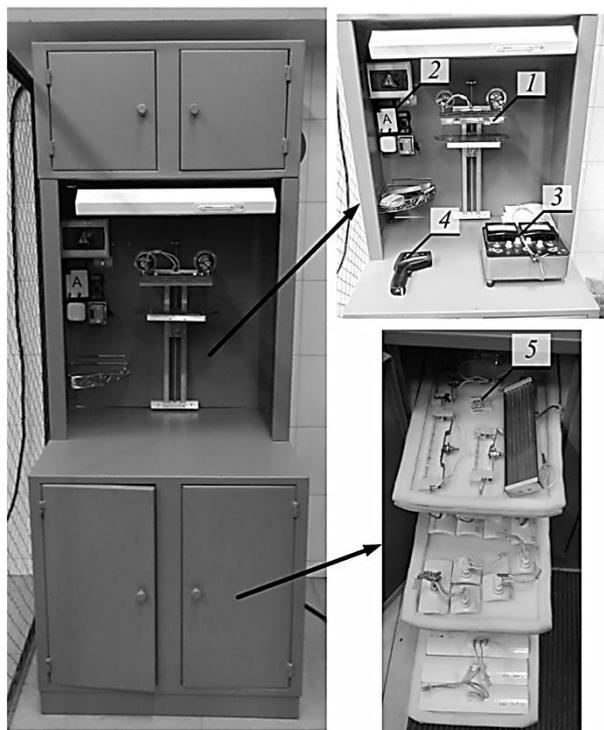


Рисунок 1 – Общий вид стенда по физическому моделированию процесса капсулирования изоляции обмоток электрических машин ТПС: 1 – инфракрасный (ИК) облучатель; 2 – панель измерений; 3 – прибор для определения терморрадиационных свойств изоляции (TermoRad-1); 4 – пирометр (ADA); 5 – выдвижные панели с ИК-излучателями различных типов

тродвигателя (ТЭД) типа НБ-514(Б). Капсулирование конвективным методом осуществлялось в печи типа СДО1 локомотивно-ремонтного депо «Нижнеудинское» [4], а терморрадиационным – на лабораторном стенде по физическому моделированию процесса капсулирования изоляции обмоток электрических машин ТПС, находящемся в лаборатории кафедры ЭПС ИргУПСа «Эффективные методы и средства продления ресурса электрических машин ТПС» [5]. Общий вид стенда представлен на рисунке 1.

В качестве пропиточного материала использовались лак ФЛ-98 и компаунды Эпласт 155, ПК-11 и ПК-21, применяемые в настоящее время при деповском и заводском ремонте ТЭД типа НБ-514(Б) в локомотивно-ремонтном депо «Нижнеудинское» и на Улан-Удэнском локомотивно-ремонтном заводе.

При капсулировании терморрадиационным методом пропитанные образцы изоляционной ленты ЛЭС располагались на медной подложке стенда на расстоянии 60 мм до ИК-излучателя, что соответствует расстоянию от сегментов лобовой части обмотки якоря до ИК-излучателей на опытно-производственной установке [1, 2] (рисунок 2).

Процесс капсулирования осуществлялся при непрерывном инфракрасном энергоподводе при излучении сначала некогерентным коротковолновым излучателем типа J118, затем средневолновым импульсно-керамическим типа ECS-2.

На начальных этапах выполнения данного эксперимента было замечено, что по завершении процесса капсулирования изоляционной ленты она приклеивалась к медной подложке. Данное явление доказывает, что ИК-излучение, проникая через пропитанную изоляцию, нагревает и саму подложку, тем самым обеспечивая процесс полимеризации пропиточного материала снизу вверх, формируя при этом дополнительный микрослой из пропиточного состава на поверхности проводника обмотки.

Следующим этапом исследований является сравнение под микроскопом Olympus GX 41 микроструктуры изоляционной ленты, закапсулированной при конвективном и терморрадиационном методах, для оценки эффективности применения названных методов в процессе ремонта электрических машин ТПС.

На рисунке 3, а представлено десятикратное увеличение ленты типа ЛЭС, пропитанной в лаке ФЛ-98 и закапсулированной конвективным способом в печи СДО1 Нижнеудинского локомотивно-ремонтного депо (ТЧР-22).

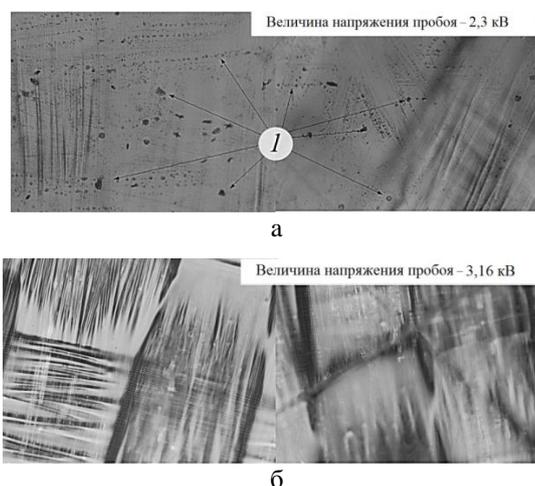


Рисунок 3 – Десятикратное увеличение закапсулированной конвективным (а) и терморрадиационным (б) методами ленты типа ЛЭС в лаке ФЛ-98: 1 – полости (микротрещины)

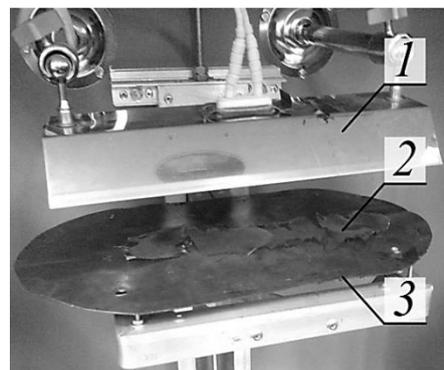


Рисунок 2 – Моделирование непрерывного ИК-энергоподвода на лабораторном стенде: 1 – ИК-облучатель; 2 – образцы изоляционной ленты; 3 – медная подложка

Из рисунка 3 видно, что при капсулировании конвективным методом на поверхности полимерной пленки образуются полости (микротрещины) 1, о природе возникновения которых говорилось ранее [1]. При капсулировании терморadiационным методом (рисунок 3, б) данные полости отсутствуют, что подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о большей эффективности применения терморadiационного метода по сравнению с конвективным.

Аналогичные результаты были получены и при капсулировании ленты типа ЛЭС, пропитанной в компаундах Эпласт 155, ПК-11 и ПК-21.

Далее у закапсулированных различными методами образцов изоляционной ленты ЛЭС проверялись электрическая прочность и твердость.

Для определения электрической прочности образцов изоляции использовали аппарат АИИ-70 (рисунок 4, а). Пробой образца производится в специальном разряднике – сосуде (рисунок 4, б) емкостью 300 – 500 см², в стенки которого вмонтированы латунные электроды, имеющие шарообразную поверхность с целью создания точечного контакта.

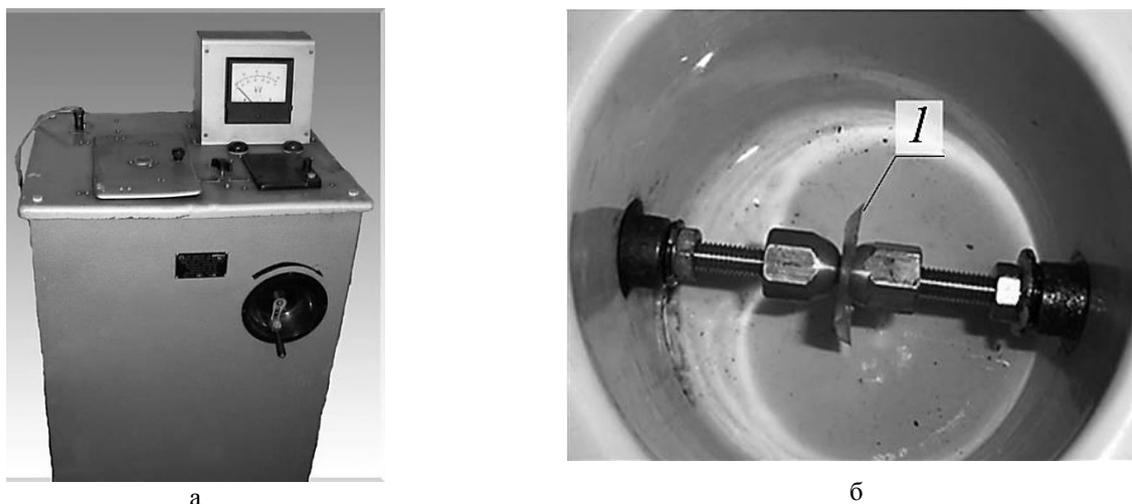


Рисунок 4 – Вид аппарата АИИ-70 (а) и сосуда с шарообразными электродами (б):
1 – закапсулированная изоляционная лента типа ЛЭС

Гистограмма средних арифметических значений пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$ в зависимости от типа изоляции и пропиточного материала представлена на рисунке 5.

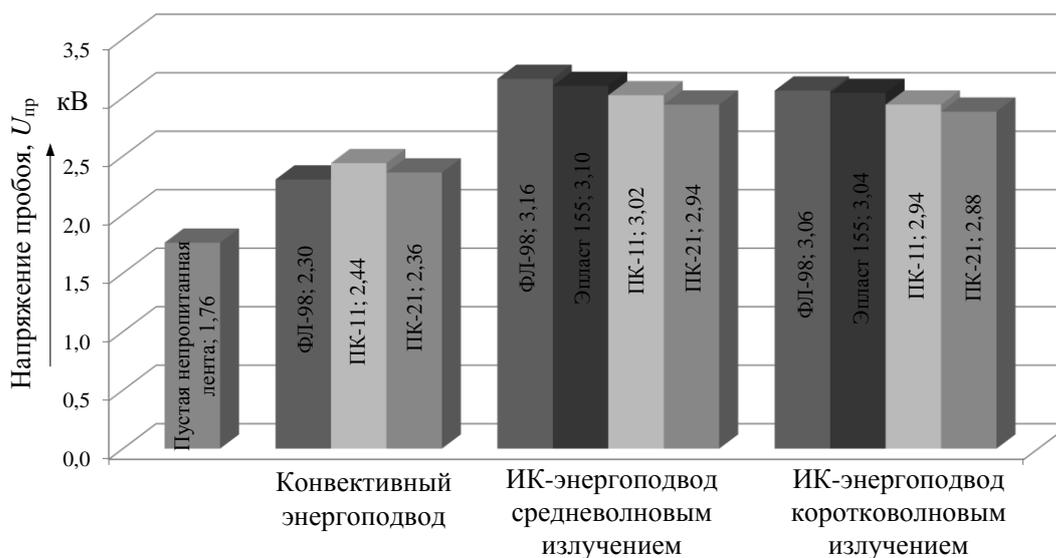


Рисунок 5 – Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности закапсулированной изоляционной ленты типа ЛЭС

Результаты данных исследований показывают, что электрическая прочность изоляционной ленты типа ЛЭС-0,1-20, закапсулированной терморadiационным методом при непрерывном режиме ИК-энергоподвода, на 30 – 35 % выше, чем при использовании конвективного метода. Причиной пониженных показателей пробивного напряжения при использовании конвективного метода капсулирования является наличие полостей (см. рисунок 3, а), которые являются зонами возникновения частичных разрядов и приводят впоследствии к электрическому пробую.

Объективным показателем цементирующей способности закапсулированной изоляции является ее твердость. Для определения твердости в процессе исследований использовался твердомер лакокрасочных покрытий Константа-ТК, предназначенный для определения твердости покрытия при царапании по нему грифелем карандаша (рисунок 6).

В ходе выполнения исследований карандаш варьируемого типа твердости перемещался под углом 45° по изоляционной ленте типа ЛЭС-0,1-20, пропитанной в лаке ФЛ-98 и компаундах Эпласт 155, ПК-11 и ПК-21, с фиксированным нажимом 9,81 Н.

При повреждении поверхности изоляции карандашом его твердость принималась за измеренное значение твердости изоляционной ленты. В работе применялось восемь типов карандашей с твердостью 4Т, 3Т, 2Т, Т, ТМ, М, 2М и 3М. Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что наибольшую твердость, равную 6 баллам, имеет образец закапсулированной изоляционной ленты, пропитанной в компаунде Эпласт 155.



Рисунок 6 – Вид твердомера Константа-ТК

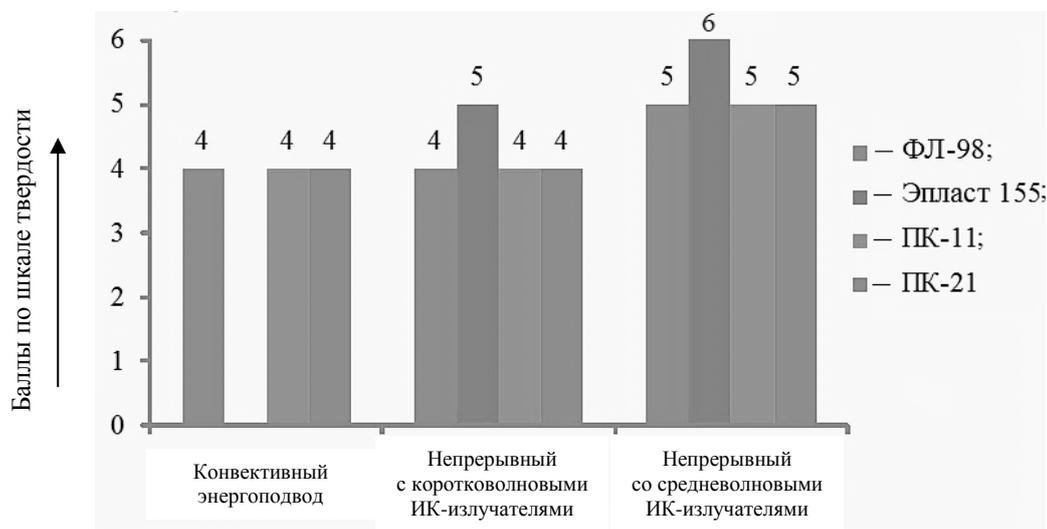


Рисунок 7 – Твердость закапсулированной при разных методах энергоподвода изоляционной ленты типа ЛЭС

Авторами планируется проведение исследований по эффективности капсулирования изоляции обмоток электрических машин ТПС непосредственно на опытно-производственной установке при осциллирующем режиме ИК-энергоподвода.

Список литературы

1. Худоногов, А. М. Анализ эффективности существующих способов сушки изоляции обмоток тяговых электрических машин [Текст] // А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский / Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – С. 422 – 425.

2. Худоногов, А. М. Инновационная технология повышения и продления ресурса тягового подвижного состава / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – № 4 (36). – С. 102 – 108.

3. Лыткина, Е. М. Селективный метод сушки увлажненной или пропитанной изоляции обмоток якорей тяговых двигателей электровозов и устройство для его реализации [Текст] / Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – № 1 (37). – С. 176 – 180.

4. Дульский, Е. Ю. Энергоаудит безразборной технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов [Текст] / Е. Ю. Дульский // Мир транспорта / МКЖТ МПС России. М. 2012. – № 3 (41). – С. 168 – 171.

5. Лыткина, Е. М. Разработка и изготовление стенда по макетированию процесса капсулирования изоляции тяговых электрических машин [Текст] / Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский // Проблемы транспорта Восточной Сибири: Сб. тр. четвертой всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых факультетов «Транспортные системы» и «Системы обеспечения транспорта» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – Ч. 1. – С. 24 – 30.

УДК 531.1

В. Ф. Кузнецов, М. Ф. Капустьян, Л. В. Ярышева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МАТЕРИАЛА КОЛЕСА В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ ЛОКОМОТИВА

В статье представлены результаты математического моделирования процесса нагрева материала колеса в режиме торможения локомотива. Полученные результаты могут быть использованы при расчете изменения температуры для любой точки колеса в процессе всего режима торможения.

Как показывает статистика, процент проворота бандажей колес локомотива происходит в режиме торможения. Очевидно, что этот факт вызван ослаблением сил сцепления бандажа с колесным центром в результате температурного изменения физико-механических параметров материала колеса. Для детального исследования процесса нагрева колеса необходимо создание математических моделей, описывающих тепловые процессы в области контакта колеса с тормозными колодками и формирования нестационарного температурного поля по объему колеса в течение всего времени торможения.

1. Определение мощности тепловой энергии трения тормозной колодки и колеса колесной пары локомотива.

При прижатии тормозной колодки к бандажу движущегося колеса в области их контакта возникает источник тепловой энергии. Интенсивность тепловыделения задается формулой:

$$W_T = N f_{ск} v A, \quad (1)$$

где N – сила прижатия колодки; $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения материалов колодки и бандажа; v – окружная скорость точек круга катания колеса; A – тепловой эквивалент механической энергии.

Так как при движении колеса по рельсу без проскальзывания имеет место соотношение $r_k \omega_k = v_{л}$, то окружная скорость v будет равна скорости локомотива $v_{л}$. Здесь r_k и ω_k – радиус круга катания и скорость вращения колеса.

В режиме торможения скорость локомотива меняется от некоторого начального значения $v_{лн}$ до заданного значения $v_{лк}$ в конечный момент тормозного режима. Для определения

закона изменения скорости локомотива рассмотрим движение колесной пары под действием сил инерции и сил трения с начальной скоростью $v_{лн}$.

При движении колес по рельсу без скольжения мгновенный центр вращения колеса расположен в точке контакта колеса с рельсом. Для составления уравнения движения колеса в режиме торможения рассмотрим расчетную схему (рисунок 1).

Воспользуемся уравнением относительно точки O_1 :

$$m_{л}r_{к}\ddot{x} + (J_{к.п} + m_{к.п}r_{к.п}^2)\ddot{\varphi} + 4Nf_{ск}r_{к} + 2P_{л}f_{кач} = 0. \quad (2)$$

здесь приняты обозначения:

$m_{к.п}$, $J_{к.п}$ – масса и момент инерции колесной пары; $R_p = P_{л}$ – реакция рельса; $P_{л}$ – вес локомотива, приходящийся на одну колесную пару; $f_{кач}$ – коэффициент трения качения колесной пары.

Так как при движении колеса без скольжения имеет место соотношение

$\ddot{\varphi} = \frac{\ddot{x}}{r}$, то уравнение (2) переписывается в виде:

$$\ddot{x} \left(\frac{J_{к.п} + m_{к.п}r_{к}^2 + m_{л}r_{к}^2}{r_{к}} \right) + 4Nf_{ск}r_{к} + 2P_{л}f_{кач} = 0. \quad (3)$$

Первый интеграл уравнения (3) при начальных условиях $\dot{x}(0) = v_{лн}$ дает решение:

$$\dot{x} = v_{лн} - Kt, \quad (4)$$

где $K = \frac{2r_{к}(Nf_{ск}r_{к} + P_{л}f_{кач})}{J_{к.п} + r_{к.п}^2(m_{к.п} + m_{л})}$.

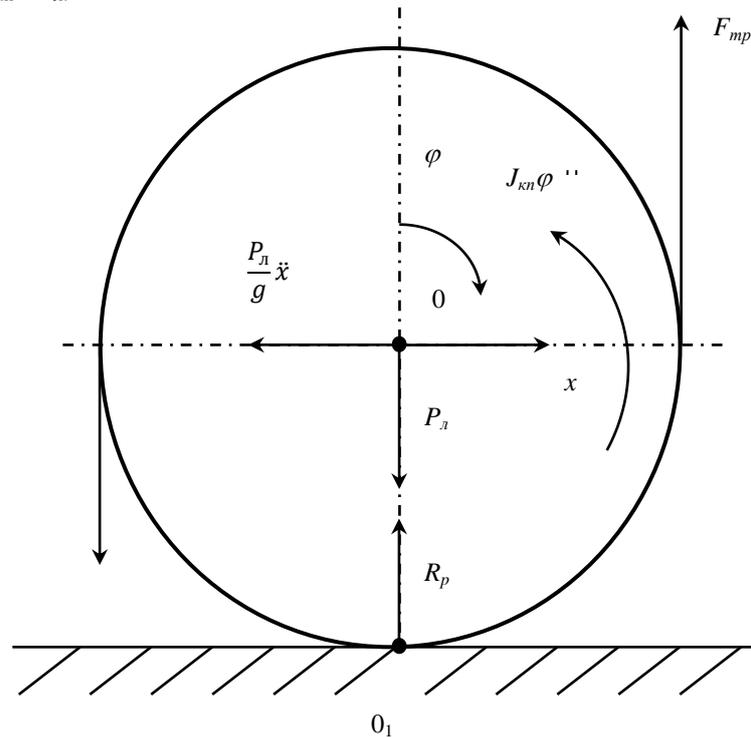


Рисунок 1 – Расчетная схема движения колесной пары в режиме торможения:
 x , φ – перемещение центра тяжести колесной пары и угол ее поворота вокруг оси

Полученная зависимость (4) является законом изменения скорости локомотива в режиме торможения:

$$v_{л} = v_{лн} - Kt. \quad (5)$$

При торможении до скорости $v_{лк}$ понадобится время

$$t_{\text{тор}} = (v_{\text{лн}} - v_{\text{лк}})/K. \quad (6)$$

С учетом выражения (4) формула (1) интенсивности тепловыделения примет вид:

$$W_T = ANf_{\text{ск}}(v_{\text{лн}} - Kt). \quad (7)$$

2. Формирование температурного поля по объему колеса

Будем считать, что прижатие тормозной колодки к бандажу происходит равномерно. Следовательно, распределение тепловой энергии по поверхности контакта колес с тормозной колодкой будет равномерным.

Можно считать температурное поле определенным, если известен закон изменения температуры произвольной точки А колеса при его вращении вокруг оси колесной пары в течение всего режима торможения.

При этом необходимо разделить область, занимаемую колесом, на две группы секторов (рисунок 2):

1) $\varphi \in [0; 2\varphi_0] \cup [\pi; \pi + 2\varphi_0]$ – секторы охвата колес тормозными колодками; при движении точки А в этих секторах формирование температурного поля происходит за счет нагрева материала колеса источником тепловой энергии и теплоотдачи в атмосферу;

2) $\varphi \in [2\varphi_0; \pi] \cup [\pi + 2\varphi_0; 2\pi]$ – секторы, свободные от тормозных колодок. В этих секторах происходит теплоотдача тепла приобретенного материалом колеса в атмосферу.

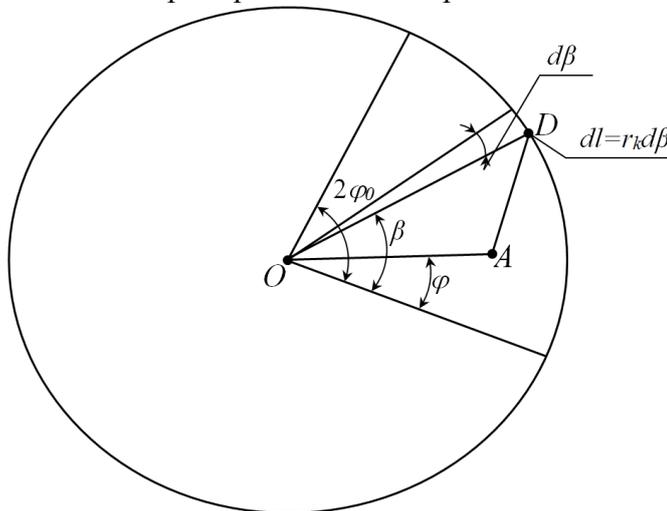


Рисунок 2 – Схема расчета закона изменения температуры в произвольной точке А колеса

2.1. Формирование температурного поля точки А при ее движении в секторе нагрева.

Представим колесо в виде пластины с толщиной δ в точке А.

Уравнение теплопроводности с учетом теплообмена для сектора нагрева имеет вид [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} \right) - b(T - T_a), \quad (8)$$

здесь $b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$, $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; α – коэффициент теплоотдачи; γ – плотность материала колеса; T_a – температура воздуха.

Для того чтобы воспользоваться решением уравнения (7), предложенным в книге [1], разобьем область контакта на элементарные участки

$$dl = r_k d\beta, \quad (9)$$

считая их линейными источниками тепловой энергии с интенсивностью

$$dq = \frac{W_T(t)}{2\varphi_0} d\beta. \quad (10)$$

Пусть источник тепла расположен в точке D (см. рисунок 2).

Решение уравнения (8) можно представить в виде:

$$T(x, y, t) = T^* e^{-bt} + T_a. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в уравнение (8), получим уравнение для определения температуры:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} \right). \quad (12)$$

Воспользуемся известным решением уравнения (12) в случае действия мгновенного линейного источника тепла dq [3]:

$$T^*(r, t) = \frac{dq}{4\sqrt{\pi a t}} e^{-r^2/4at}, \quad (13)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от источника тепла до произвольной точки нагреваемого тела.

Температура в точке A определяется выражением:

$$T(r, t) = \frac{dq}{4\sqrt{\pi a t}} e^{(-r_D^2/4at - bt)} + T_a, \quad (14)$$

здесь r_D – расстояние от точки A до источника тепла (см. рисунок 2).

Если перейти к полярной системе координат и принять координаты точек $A(\rho, \varphi)$ и $D(\beta, r_k)$, то величина r_D^2 определится как

$$r_D^2 = \rho^2 + r_k^2 - 2\rho r_k \cos(\beta - \varphi). \quad (15)$$

Используя принцип суперпозиции и интегрируя выражение (14) по β , получим температуру в произвольной точке A колеса от действия мгновенного источника тепловой энергии, распределенного по всей области контакта тормозной колодки и бандажа:

$$T(\rho, \varphi, t) = \int_0^{2\varphi_0} \frac{W_T(t)}{8\sqrt{\pi a t} 2\varphi_0} e^{-(\rho^2 + r_k^2 - 2\rho r_k \cos(\beta - \varphi))/4at + bt} d\beta + T_a. \quad (16)$$

Для непрерывно действующего источника тепла с интенсивностью $W_T(t)$ закон изменения температуры в точке A найдем из следующих соображений. Считаем, что на интервале времени $[0; t]$ последовательно включаются мгновенные источники с интенсивностью W_T и формируют температуру в точке A согласно выражению (16).

Рассмотрим произвольный момент времени τ на отрезке $[0; t]$. Мгновенный источник, включенный в данный момент времени, имеет мощность $W_T(\tau)$. За элементарное время $d\tau$ источник тепловой энергии выделит количество тепла

$$dQ = W_T(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Тепло dQ распространяется по объему колеса в течение времени $t - \tau$ и к моменту времени t приведет к повышению температуры в точке A в соответствии с выражением (16):

$$dT(\rho, \varphi, t) = \left[\int_0^{2\varphi_0} \frac{W_T(\tau)}{8\sqrt{\pi a t} 2\varphi_0 (t-\tau)} e^{-\frac{(\rho^2 + r_k^2 - 2\rho r_k \cos(\beta - \varphi))}{4a(t-\tau)} + b(t-\tau)} d\beta \right] d\tau + T_a. \quad (18)$$

По принципу суперпозиции закон изменения температуры в точке A в зависимости от времени действия источника тепловой энергии находим интегрированием выражения (17):

$$T(\rho, \varphi, t) = T_H + \frac{ANf_{ск}}{8\sqrt{\pi a} \varphi_0} \int_0^t \left[\int_0^{2\varphi_0} \frac{(v_{лн} - Kt)}{(t-\tau)} e^{-\frac{(\rho^2 + r_k^2 - 2\rho r_k \cos(\varphi - \beta))}{4a(t-\tau)} + b(t-\tau)} d\beta \right] d\tau + T_a. \quad (19)$$

Найдем выражение для определения температуры в произвольной точке $A(\rho, \varphi)$ колеса при ее движении относительно тормозной колодки. Точка А будет перемещаться с окружной скоростью

$$v_A = v_{л\rho}/r_k, \quad (20)$$

при вращении вокруг колесной пары.

Путь из точки $A(\rho, 0)$ в положение $A(\rho, \varphi)$ она пройдет за время t^* . В режиме торможения скорость локомотива $v_{л}$ является функцией времени. Так как

$$\partial\varphi/\partial t = v_{л}/r_k, \quad (21)$$

то с учетом выражения (5) получим уравнение для определения времени t^* :

$$\partial\varphi/\partial t = (v_{л} - Kt)/r_k. \quad (22)$$

Интегрируем уравнение (22) в пределах $[0; t^*]$:

$$2Kr_k\varphi = v_{лн} - (v_{лн} - Kt^*)^2. \quad (23)$$

Отсюда находим

$$t^* = \frac{1}{K} [v_{лн} - \sqrt{v_{лн}^2 - 2Kr_k\varphi}]. \quad (24)$$

Подставляя в формулу (19) вместо t выражение t^* , находим температуру, которую приобретает точка А материала колеса, двигаясь в зоне действия источника тепловой энергии из начального положения $A(\rho, 0)$ в точку $A(\rho, \varphi)$:

$$T_{нагр}(\rho, \varphi, v_{л}) = T_{0H} + \frac{ANf_{ск}}{8\gamma\pi a\varphi_0} \int_0^{t^*} \left[\int_0^{2\varphi_0} \frac{(v_{лн}-K\tau)}{(t^*-\tau)} e^{-\left(\rho^2+r_k^2-2\rho r_k \cos(\varphi-\beta)\right)/4a(t^*-\tau)+b(t^*-\tau)} d\beta \right] d\tau + T_a. \quad (25)$$

Нагрев точки А будет происходить в течение времени ее нахождения в области $[0; 2\varphi_0]$ действия источника тепловой энергии:

$$t_{нагр} = \frac{1}{K} [v_{лн} - \sqrt{v_{лн}^2 - 4Kr_k\varphi_0}]. \quad (26)$$

Меняя значения ρ в пределах $[0; r_k]$ и φ в пределах $[0; 2\varphi_0]$ в формуле (25), получаем распределение температурного поля материала колеса, находящегося в секторе нагрева.

Наибольшее значение температуры $T_{нагр}$ материальная точка $A(\rho, \varphi)$ приобретает при $\varphi = 2\varphi_0$ (определяется по формуле (25)), эта величина будет служить начальным значением для расчета температурного поля при прохождении точкой А сектора охлаждения.

2.2. Температурное поле точек материала колеса при их движении в зоне теплоотдачи.

Формирование температурного поля материала колеса в процессе охлаждения происходит согласно дифференциальному уравнению [2]:

$$\frac{dT}{dt} = -b(T - T_a). \quad (27)$$

Начальное значение $T_{а\text{охл}}$ температуры точки А при охлаждении будет равно значению температуры этой точки, приобретенному в конечный момент стадии нагрева, и определяется из формулы (25) при $\varphi = 2\varphi_0$.

Уравнение (27) решается на основе закона изменения температуры в произвольной точке $A(\rho, \varphi)$ при $\rho \in [0; r_k]$ и $\varphi \in [2\varphi_0; 2\pi]$:

$$T_{охл} = T_a + (T_{охл} - T_a)e^{-bt}. \quad (28)$$

Охлаждение материала колеса в точке А будет происходить в течение времени

$$t_{\text{охл}} = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}} - \sqrt{v_{\text{лн}}^2 - 2Kr_k(2\pi - 2\varphi_0)} \right]. \quad (29)$$

В конечный момент стадии охлаждения температура в точке А определится выражением:

$$T_{\text{к охл}} = T_a + (T_{\text{н охл}} - T_a)e^{-bt_{\text{охл}}}. \quad (30)$$

Эта температура будет являться начальным значением для стадии нагрева материала колеса в точке А при ее прохождении зоны охвата второй тормозной колодкой.

2.3. Температурное поле материала колеса в течение всего процесса торможения.

В процессе торможения локомотива формирование температуры в произвольной точке А колеса будет происходить по циклу «нагрев – охлаждение». Причем за один оборот колеса этот цикл повторится дважды.

В формулах (26) и (28) от цикла к циклу будут меняться начальные значения температур $T_{\text{н охл}}$ и $T_{\text{он}}$. При этом конечное значение температуры точки А при нагреве будет начальным значением для расчета процесса охлаждения ($T_{\text{н охл}} = T_{\text{кн}}$), а конечное значение температуры процесса охлаждения точки А будет начальным для процесса ее нагрева ($T_{\text{н}} = T_{\text{к охл}}$). Процесс формирования температурного поля будет длиться в течение времени режима торможения локомотива.

Скорость вращения колеса в режиме торможения меняется по закону:

$$\omega_k = \frac{v_{\text{лн}} - Kt}{r_k}. \quad (31)$$

Время, в течение которого колесо повернется на угол φ с начала торможения, определится формулой (24):

$$t = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}} - \sqrt{v_{\text{лн}}^2 - 2Kr_k\varphi} \right].$$

Зная общее время торможения $t_{\text{тор}}$, найдем полный угол поворота колеса за это время:

$$\varphi_{\text{тор}} = \frac{v_{\text{лн}}^2 - v_{\text{лк}}^2}{2Kr_k}. \quad (32)$$

Тогда число полных оборотов колеса в процессе торможения

$$n = \frac{\varphi_{\text{тор}}}{2\pi} = \frac{v_{\text{лн}}^2 - v_{\text{лк}}^2}{4\pi Kr_k}. \quad (33)$$

Число циклов «нагрев – охлаждение» будет в два раза превышать количество оборотов колеса $k = \frac{\varphi_{\text{тор}}}{\pi}$.

От цикла к циклу будут меняться начальные значения температур $T_{\text{н охл}}$ и $T_{\text{он}}$ и скорость движения локомотива $v_{\text{л}}$.

Определим продолжительность времени и начальную скорость локомотива для n -го цикла:

$$t_n = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}(n)} - \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 4Kr_k\varphi_0} \right]; \quad (34)$$

$$v_{\text{лн}(n)} = \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 2Kr_k\pi(n-1)}, \quad (35)$$

где $n = 1, \dots, k$.

Для расчета температурного поля в произвольной точке А колеса за время n -го цикла «нагрев – охлаждение» в формулах (24) – (26) и (29) необходимо заменить $v_{\text{лн}}$ на $v_{\text{лн}(n)}$.

Тогда расчетные формулы для определения температуры колеса на стадиях нагрева и охлаждения примут следующий окончательный вид:

стадия нагрева точки А ($0 \leq \varphi \leq 2\varphi_0$) –

$$t^* = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}(n)}^2 - \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 2Kr_k\varphi} \right]; \quad (36)$$

$$v_{\text{лн}(n)} = \sqrt{v_{\text{лн}}^2 - 2Kr_k\pi(n-1)}; \quad (37)$$

$$T_H(n) + \frac{ANf_{\text{ск}}}{8c\gamma\pi a\varphi_0} \int_0^{t^*} \left[\int_0^{2\varphi_0} \frac{v_{\text{л}(n)-K\tau}}{(t^*-\tau)} e^{-\frac{\rho^2+r_k^2-2\rho r_k \cos(\varphi-\beta)}{4a(t^*-\tau)+b(t^*-\tau)}} d\beta \right] d\tau + T_a; \quad (38)$$

время стадии нагрева n -го цикла –

$$t_{\text{нагр}(n)} = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}(n)} - \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 4Kr_k\varphi_0} \right]; \quad (39)$$

стадия охлаждения ($2\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi$):

время процесса охлаждения –

$$t_{\text{охл}(n)} = \frac{1}{K} \left[v_{\text{лн}(n)} - \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 4Kr_k\pi} \right] - t_{\text{нагр}(n)}; \quad (40)$$

$$T_{\text{охл}}(\rho, \varphi) = T_a + [T_{\text{н охл}}(n) - T_a] e^{-\frac{b}{K} \left[v_{\text{лн}(n)} - \sqrt{v_{\text{лн}(n)}^2 - 2Kr_k\varphi} \right]}. \quad (41)$$

Для определения значений начальной температуры стадий нагрева и охлаждения точки $A(\rho, \varphi)$ для n -го цикла воспользуемся формулами (35) и (38):

$$T_{0\text{н}}(\rho, 0, v_{\text{л}(n+1)}) = T_{\text{к охл}}(\rho, \pi, v_{\text{л}(n)}); \quad (42)$$

$$T_{\text{н охл}}(\rho, 2\varphi_0, v_{\text{л}(n)}) = T_{\text{к нагр}}(\rho, 2\varphi_0, v_{\text{л}(n)}). \quad (43)$$

Для первого цикла «нагрев – охлаждение» ($n=1$) значение начальной температуры при нагреве принимаем равным значению температуры воздуха:

$$T_{0\text{н}}(\rho, 0, v_{\text{лн}(1)}) = T_a. \quad (44)$$

Полученные математические модели позволяют рассчитать изменение температуры для любой точки колеса в процессе всего режима торможения. Для определения изменения температуры в области сцепления центра колеса с бандажом достаточно в формулах (36) – (44) принять $\rho = r_{\text{ц}}$, где $r_{\text{ц}}$ – радиус центра колеса.

Полученные уравнения и расчетные формулы позволяют прогнозировать изменение микроструктуры стали колесных пар, связанное с изменением температуры, что в свою очередь дает возможность определить взаимосвязь между механическими свойствами колеса и режимами ведения поезда. Кроме того, данная модель позволяет дать оценку влияния технологических и эксплуатационных параметров на целостность колесной пары.

Список литературы

1. Опоры осей и валов машин и приборов [Текст] / Н. А. Спицын, М. М. Машнев и др. – Л.: Машиностроение, 1970. – 520 с.
2. Прохоров, Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке [Текст] / Н. Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

УДК 621.33

Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов

ОСНОВЫ ЛОКАЛЬНОГО МЕТОДА ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Основным повреждаемым узлом тяговых электрических машин тягового подвижного состава является изоляция в области основания лобовой части. Несовершенная система изоляции в торцевой части лобовых обмоток приводит к влажности. Причиной неудовлетворительной надежности является также повышенная напряженность в этой зоне. В качестве мероприятий, разработанных для продления ресурса электрических машин, авторами предлагается система локального капсулирования изоляции энергией ИК-излучения.

Электрические машины (ЭМ) тягового подвижного состава (ТПС) относятся к предельно нагруженному оборудованию, и поэтому с позиций комплексного воздействия на них тепловых, электромагнитных, механических и климатических факторов, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера при изготовлении и ремонте, уровень повреждаемости их в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким. Современные технологии по изготовлению коллекторных тяговых двигателей электровозов позволяют повысить ресурс по остовам на пробег до 2,5 млн км, однако использование этих же технологий для изготовления якорей не обеспечивает ресурс их более чем на 1 млн км пробега. Наиболее высокие показатели по неудовлетворительной надежности – у тяговых электрических машин грузовых электровозов, особенно низкие – у грузовых электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах Восточного региона страны (Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Дальневосточная железные дороги). Основным лимитирующим элементом в надежности электрических машин тягового подвижного состава является изоляция. Одним из определяющих факторов, воздействующих на старение изоляции, является скорость нагревания изоляции электрической машины, т. е. быстрое изменение температуры обмоток до предельно допустимых значений для изоляции соответствующего класса нагревостойкости, особенно с переходом через 0 °С, что характерно для эксплуатации локомотивов в зоне «северного хода» на Восточно-Сибирской железной дороге. Морозы на участках эксплуатации достигают –50 °С и ниже, перепады температуры в течение суток до 20 – 35 °С, продолжительность работы при отрицательной температуре внешней среды составляет до 11 месяцев в году. При прохождении электровозами в зимний период искусственных сооружений (Северо-Муйский тоннель) разница значений температуры за короткий период – более 60 °С. Аналогичное положение наблюдается и на других железных дорогах Сибири, Севера и Дальнего Востока [1]. Налицо проблемная ситуация, которая заключается в необходимости увеличения срока службы ЭМ ТПС в неблагоприятных условиях эксплуатации на железных дорогах Восточного региона и отсутствии соответствующей данным условиям зональной системы продления ресурса изоляции с минимальными затратами в процессах технического обслуживания и ремонта локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава.

Исследованию надежности, повышению и продлению ресурса тягового подвижного состава железных дорог, системам технического диагностирования и ремонта уделялось значительное внимание различными научными коллективами.

Большой вклад в изучение перечисленных проблем внесли Ю. А. Бахвалов, В. И. Бервинов, И. В. Бирюков, И. Н. Богаенко, В. И. Бочаров, А. А. Воробьев, А. И. Володин, И. И. Галиев, З. Г. Гюев, А. В. Горский, В. Г. Григоренко, А. А. Зарифьян, Д. Д. Захарченко, И. П. Исаев, В. А. Камаев, В. И. Киселев, В. Г. Козубенко, В. А. Кучумов, А. Л. Курочка, А. А. Лисицин, В. Н. Лисунов, В. Б. Медель, М. Д. Находкин, Е. С. Павлович, М. П. Пахомов, А. В. Плакс, В. В. Привалов, Н. А. Ротанов, А. Н. Савоськин, И. В. Скогорев, В. В. Стрекопытов, Т. А. Тибилов, В. П. Феоктистов, В. А. Четвергов, В. Г. Щербаков, В. П. Янов и другие исследователи.

Значительный вклад в решение вопросов надежности наиболее «слабых» узлов тяговых электрических машин – изоляционных конструкций и коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей внесли такие ученые, как В. Д. Авилов, А. Е. Алексеев, А. А. Бакланов, В. Г. Галкин, М. Д. Глущенко, А. Т. Головатый, И. П. Гордеев, А. В. Грищенко, Р. М. Девликамов, Г. Б. Дурандин, М. Г. Дурандин, Ш. К. Исмаилов, М. Ф. Карасев, В. И. Карташев, А. С. Космодамианский, В. А. Кручек, А. С. Курбасов, А. Б. Лебедев, Е. Ю. Логинова, А. С. Мазнев, Р. Я. Медлин, А. Т. Осяев, А. Д. Петрушин, В. М. Попов, Н. П. Семенов, А. С. Серебряков, В. П. Смирнов, Л. Н. Сорин, Н. О. Фролов, В. В. Харламов, О. И. Хомутов, В. А. Шевалин, и многие другие.

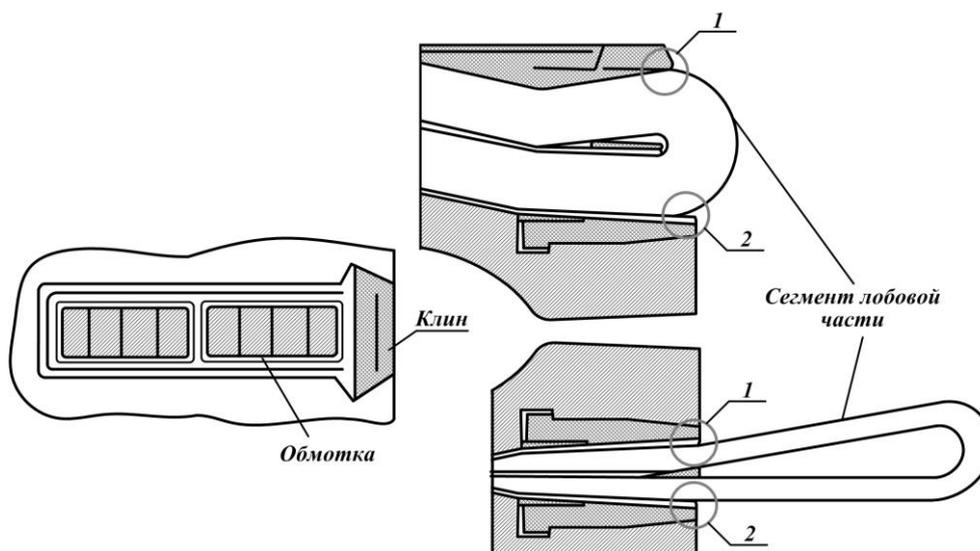


Рисунок 1 – Места проникновения влаги в паз из-за несовершенства конструкции обмоток якоря (вверху) и статора (внизу) ЭМ: 1, 2 – зоны возможного проникновения влаги

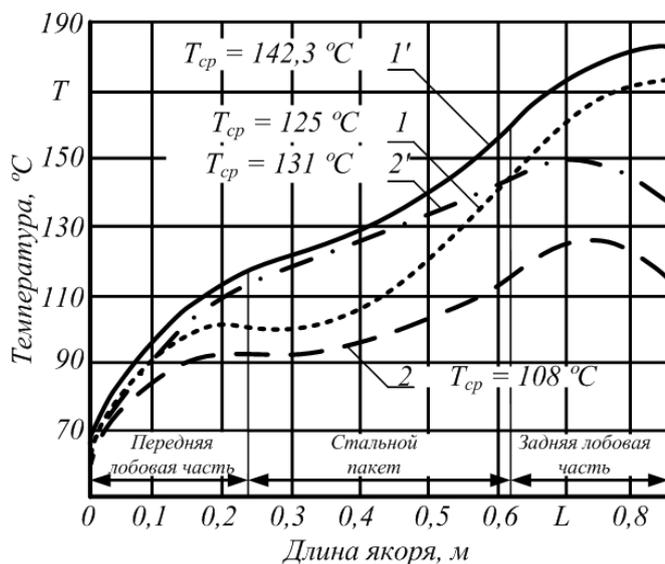


Рисунок 2 – Зависимости превышения температуры обмоток якорей ТД НБ-418К6 с закрытыми (1 – при $P_{ч} = 790$ кВт и 1' – при $P_{ч} = 835$ кВт) и НБ-514 с открытыми головками секций (2 и 2' – при тех же мощностях)

В работах предшественников и нашими исследованиями было установлено, что конструктивное исполнение лобовых частей обмотки и систем вентиляции создает условия для повреждения изоляции преимущественно у выхода стержней из пазов или в торце. Со временем происходит опускание корзинки лобовых частей обмотки, в связи с чем появляются дополнительные напряжения, а лобовые части становятся наиболее уязвимыми при вибрации и ударах под действием внезапных электродинамических усилий (короткие замыкания, пуск, реверсы и т. д.). Проведенные исследования показали, что амплитуда вибрации лобовых частей обмоток крупных электрических машин при этих условиях может измеряться миллиметрами, что соответствует деформации на поверхности изоляции порядка $10^{-4} \dots 10^{-3}$ относительных

единиц. Такая амплитуда особенно опасна при пуске электрических машин из холодного состояния, когда эластичность изоляции понижена. Вторым фактором, оказывающим отрицательное влияние на торцевые части лобовых обмоток, является повышенная влажность в этой

зоне из-за несовершенства систем вентиляции. Можно полагать, что влага из этой зоны через лобовую часть перемещается по капиллярам в пазовую часть обмотки, в результате чего наступает переувлажнение изоляции и ее пробой (см. рисунок 1). Несовершенство систем вентиляции создает также неравномерность перегрева изоляции в различных точках обмотки. Исследованиями ученых ВЭЛНИИ была получена картина распределения температуры по длине якоря тяговых электродвигателей грузовых электровозов переменного тока при различных параметрах часового тока (рисунок 2).

Как следует из рисунка 2, превышение температуры по задней лобовой части якоря (со стороны, противоположной коллектору) достигает значений на 25...35 % больше, чем на передней лобовой части.

Опасным для изоляции в рабочих условиях являются частичные разряды, образующиеся под действием электрического поля как внутри, так и на внешней поверхности изоляции [2]. При этом частичные разряды действуют в зоне сердечника (пазовая часть) и в месте выхода обмотки из паза (лобовая часть).

Картина эпюры электрического поля в месте выхода секции из паза сердечника (рисунок 3) аналогична полю проходного изолятора.

В зоне лобовой части возникают направленные вдоль поверхности разряды. С повышением напряжения такие разряды могут проскакивать на большую длину, вплоть до полного перекрытия лобовой части. Начальное напряжение обеих стадий (кВ) описывается общей формулой Теплера, полученной эмпирическим путем:

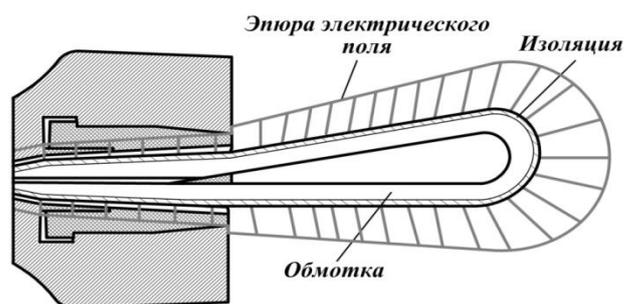


Рисунок 3 – Картина эпюры электрического поля в месте выхода секции из паза сердечника обмотки АВМ электровоза

$$U_H = 1,36 \cdot 10^4 \cdot C_{уд}^{-0,45}, \quad (1)$$

где C – удельная поверхностная емкость изоляции [$\Phi/\text{см}^2$].

Такие тлеющие разряды возникают при напряжении, в три – четыре раза меньшем рабочего, и могут повреждать изоляцию при длительной эксплуатации.

Краевые разряды устраняются с помощью изменения конструкции изоляции лобовой части обмотки – на ее поверхность наносится полупроводящее покрытие высокого сопротивления [3].

При создании электровозов нового поколения планируется широкое внедрение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на новой полупроводниковой элементной базе.

В большинстве современных преобразователей частоты используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) с частотой переключения $2 \div 8$ кГц. [4].

Длительность фронта импульсов определяется типом ключевых элементов преобразователя, он может составлять $0,2 \div 1$ мкс.

Как известно из теории переходных процессов, подача на обмотку асинхронного двигателя импульса прямоугольной формы с большой скоростью нарастания вызывает протекание в обмотке волновых процессов. Под волновыми процессами следует понимать весь сложный комплекс физических явлений, сопровождающих возникновение, распространение и быстрое изменение электромагнитного поля цепи или системы. Эти явления вызывают в обмотке значительное перенапряжение, что отрицательно влияет на изоляцию двигателя, при этом прочность и долговечность функционирования машины снижаются. Кроме того, при быстром нарастании напряженности электрического поля на фронте волны в изоляции машины возникают заметные электрические потери.

Таким образом, проблема локальных методов повреждения изоляции обмоток электрических машин имеет место. Эта проблема заключается в необходимости увеличения срока службы ЭМ ТПС в неблагоприятных условиях эксплуатации на железных дорогах Восточного региона и

в отсутствии соответствующей данным условиям зональной системы продления ресурса изоляции. Внедрение зональной системы продления срока службы ЭМ ТПС путем локальных методов восстановления изоляции позволит с минимальными затратами получить требуемый результат независимо от существующих систем технического обслуживания и ремонта.

В локальных методах восстановления изоляции предлагается использовать тепловое излучение, позволяющее прецизионно транспортировать поток электронов в точку повреждения изоляции обмотки электрической машины с целью ее восстановления. Механизм восстановления изоляции локальным методом представлен на рисунке 4.

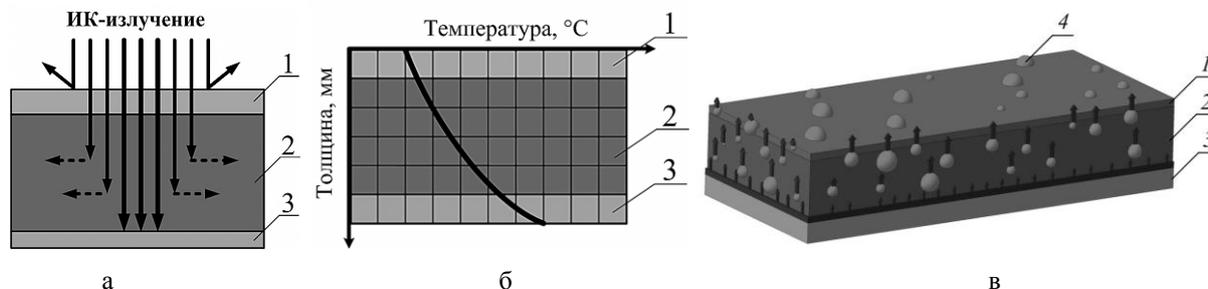


Рисунок 4 – Механизм восстановления изоляции локальным методом:

1 – электроизоляционный пропиточный материал (лак, компаунд и т. д.);

2 – пропитанный изоляционный материал; 3 – проводник обмотки ЭМ; 4 – пары растворителя

При восстановлении изоляции локальным методом с использованием теплового излучения используется вид нагрева, основывающийся на поглощении изоляционными материалами энергии субинфра и инфракрасного (ИК) излучения. Преобразование энергии излучения в тепловую происходит в некотором слое изоляции, глубина которого определяется длиной волны и оптическими свойствами изоляционных материалов. Тепловые лучи, в основном коротко- и средневолновые с длиной волны 0,8 – 5,0 мкм, проходят расстояние от источника излучения до облучаемой поверхности почти без потерь (коэффициенты отражения и поглощения), а основные диффузионные процессы имеют оптимальное направление (рисунок 4). Нагретые основным потоком ИК-лучей металлические части обмотки 3, в свою очередь, нагревают лакокрасочный материал 2 снизу, способствуя передаче тепла от нижних слоев изоляции к верхним и ускоряя удаление растворителя 4, тем самым значительно сокращая процесс восстановления изоляции (капсулирования).

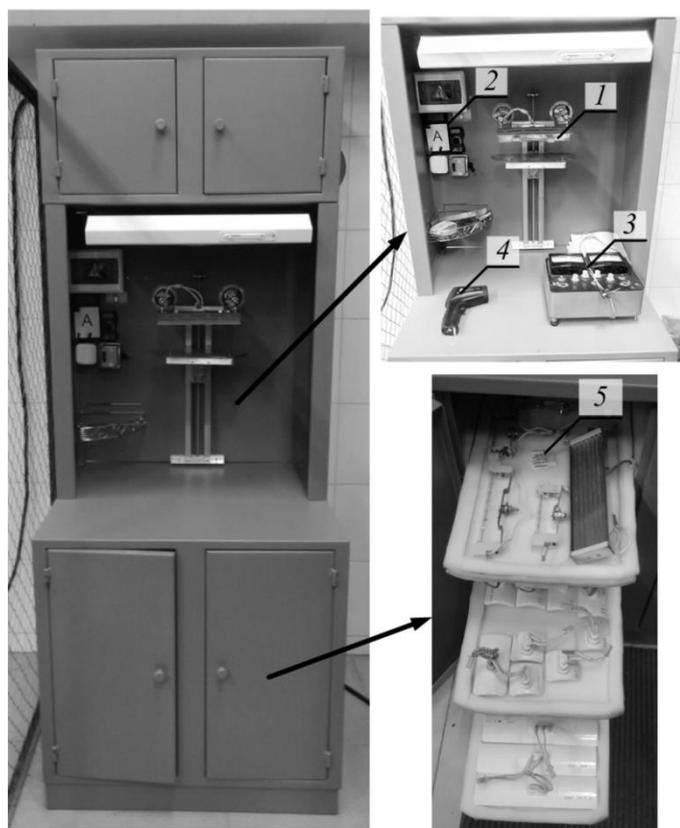


Рисунок 5 – Общий вид лабораторного стенда для физического моделирования процессов восстановления изоляции тепловым излучением:

1 – ИК-излучатель;

2 – панель измерений; 3 – прибор для определения терморadiационных свойств изоляции (TermoRad-1);

4 – пирометр (ADA); 5 – выдвижные панели с ИК-

излучателями различных типов и видов

С целью проверки гипотезы и изучения механизма процесса капсулирования изоляции обмоток электрических машин тепловым излучением была спроектирована и изготовлена лабораторная установка, общий вид которой представлен на рисунке 5.

Основная часть оборудования стенда и его пускозащитная аппаратура смонтированы на стеллаже 2 (см. рисунок 5). В верхней части стенда предусмотрена вытяжная вентиляция, предназначенная для удаления паров растворителей пропитанной изоляции. В нижней части стенда установлен шкаф 5, в котором расположены различные виды ИК-излучателей.

ИК-излучатель монтируется к закрепленному на стенде ИК-облучателю 1 при помощи специальной крепежной скобы. Расстояние от ИК-излучателя до медной подложки, на которую устанавливается изоляционная лента, регулируется при помощи подвижной алюминиевой рамы и варьируется в диапазоне от 0 до 45 см. Плотность излучения изменяется при помощи регулятора мощности типа NF245.

Стенд позволяет осуществлять физическое моделирование технологии восстановления изоляции и получать основные характеристики в процессе взаимодействия системы «облучатель – материал».

В дальнейшем планируется проведение работы по математическому моделированию с применением современных программных комплексов по инженерному анализу корпорации MSC Software. В связи с этим на представленном лабораторном стенде будет проверяться сходимость математических моделей с реальными экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Худоногов, А. М. Инновационная технология повышения и продления ресурса тягового подвижного состава [Текст] / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 4 (36). – С. 102 – 108.
2. Ваксер, Н. М. Изоляция электрических машин [Текст]: Учебное пособие / Н. М. Ваксер / Ленинградский политехн. ин-т. – Л., 1985.
3. Ваксер, Н. М. Изоляция электрических машин: Лабораторный практикум [Текст] / Н. М. Ваксер, Л. К. Бородулина, В. В. Старовойтенков / Ленинградский политехн. ин-т. – Л., 1994. – 72 с.
4. Белассел, М.-Т. Емкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя [Текст] / М.-Т. Белассел, В. Я. Беспалов, Ш. Бухемис // Электротехника. – 2005. – № 1. – С. 44 – 48.

УДК 621.316.97

К. В. Авдеева, А. А. Медведева, Н. К. Слептерева

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХ ОДНОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ

В статье приводится решение системы уравнений для расчета тока и напряжения трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния.

В электроснабжении, телемеханике и связи на железнодорожном транспорте широко используются электрические линии различных конструкций, которые работают в условиях взаимных влияний, а также влияния со стороны электротяги и линий электропередачи. Любая такая линия может быть представлена как однопроводная или как сочетание n однопроводных линий в зависимости от конструкции. Переход энергии с одной линии на другую обеспечивается за счет электромагнитных связей между отдельными проводниками. Таким образом, наличие соседних линий, проходящих параллельно рассматриваемой, ведет к изменению распределения токов и напряжений во всех линиях.

Решение системы уравнений для токов и напряжений для двух однопроводных линий с учетом их взаимного влияния представлено в работе [1, 2]. Поскольку в системе электро-

снабжения наиболее часто применяются линии с тремя проводниками (трехфазные воздушные и кабельные линии), особый интерес представляет решение аналогичной системы для трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния.

Рассмотрим три параллельно расположенные однородные однопроводные изолированные линии равной длины (рисунок 1). Каждая линия характеризуется первичными параметрами на единицу длины: R_i – сопротивление i -й линии; L_i – индуктивность i -й линии; G_i – проводимость изоляции i -й линии по отношению к земле; C_i – емкость изоляции i -й линии по отношению к земле. Кроме собственных между линиями на единицу длины имеются M_{ij} – взаимная индуктивность между i -й и j -й линиями; G_{ij} , C_{ij} – взаимная проводимость изоляции и емкость между i -й и j -й линиями.

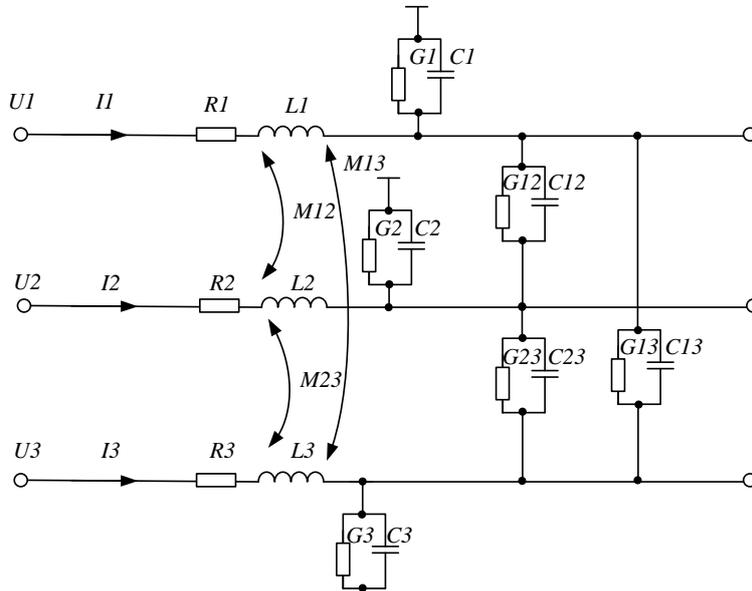


Рисунок 1 – Схема замещения трех однопроводных линий

Схема замещения трех однопроводных линий приведена на рисунке 1.

Первичные и взаимные параметры линий предполагаются известными [3]. Для определения изменения тока и напряжения по длине линии составим систему дифференциальных уравнений:

Решение системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{dU_1(x)}{dx} = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1(x) + j\omega M_{12} \cdot I_2(x) + j\omega M_{13} \cdot I_3(x); \\ -\frac{dU_2(x)}{dx} = (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_2(x) + j\omega M_{21} \cdot I_1(x) + j\omega M_{23} \cdot I_3(x); \\ -\frac{dU_3(x)}{dx} = (R_3 + j\omega L_3) \cdot I_3(x) + j\omega M_{31} \cdot I_1(x) + j\omega M_{32} \cdot I_2(x); \\ -\frac{dI_1(x)}{dx} = (G'_1 + j\omega C'_1) \cdot U_1(x) - (G_{12} + j\omega C_{12}) \cdot U_2(x) - (G_{13} + j\omega C_{13}) \cdot U_3(x); \\ -\frac{dI_2(x)}{dx} = (G'_2 + j\omega C'_2) \cdot U_2(x) - (G_{21} + j\omega C_{21}) \cdot U_1(x) - (G_{23} + j\omega C_{23}) \cdot U_3(x); \\ -\frac{dI_3(x)}{dx} = (G'_3 + j\omega C'_3) \cdot U_3(x) - (G_{31} + j\omega C_{31}) \cdot U_1(x) - (G_{32} + j\omega C_{32}) \cdot U_2(x), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $G'_i = G_i + G_{ij}$; $C'_i = C_i + C_{ij}$.

Рассмотрим случай трех одинаковых однопроводных линий. Учитывая равенство первичных, а также взаимных параметров, введем обозначения:

$$(R_1 + j\omega L_1) = (R_2 + j\omega L_2) = (R_3 + j\omega L_3) = A; \quad (2)$$

$$j\omega M_{12} = j\omega M_{13} = j\omega M_{21} = j\omega M_{23} = j\omega M_{31} = j\omega M_{32} = B; \quad (3)$$

$$(G'_1 + j\omega C'_1) = (G'_2 + j\omega C'_2) = (G'_3 + j\omega C'_3) = C; \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 (G_{12} + j\omega C_{12}) &= (G_{13} + j\omega C_{13}) = (G_{21} + j\omega C_{21}) = (G_{23} + j\omega C_{23}) = (G_{31} + j\omega C_{31}) = \\
 &= (G_{32} + j\omega C_{32}) = D.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Умножим каждое уравнение системы (1) на -1 :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dU_1(x)}{dx} &= -A \cdot I_1(x) - B \cdot I_2(x) - B \cdot I_3(x); \\
 \frac{dU_2(x)}{dx} &= -A \cdot I_2(x) - B \cdot I_1(x) - B \cdot I_3(x); \\
 \frac{dU_3(x)}{dx} &= -A \cdot I_3(x) - B \cdot I_1(x) - B \cdot I_2(x); \\
 \frac{dI_1(x)}{dx} &= -C \cdot U_1(x) + D \cdot U_2(x) + D \cdot U_3(x); \\
 \frac{dI_2(x)}{dx} &= -C \cdot U_2(x) + D \cdot U_1(x) + D \cdot U_3(x); \\
 \frac{dI_3(x)}{dx} &= -C \cdot U_3(x) + D \cdot U_1(x) + D \cdot U_2(x).
 \end{aligned} \right. \tag{6}$$

Дифференцируем по переменной x первое уравнение системы (6):

$$\frac{d^2U_1(x)}{dx^2} = -A \frac{dI_1(x)}{dx} - B \frac{dI_2(x)}{dx} - B \frac{dI_3(x)}{dx}. \tag{7}$$

Подставим выражения для расчета тока из системы уравнений (6) в (7):

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2U_1(x)}{dx^2} &= -A(-C \cdot U_1(x)) - B(D \cdot U_2(x)) - B(D \cdot U_3(x)) = (AC - 2 \cdot BD) \cdot U_1(x) + \\
 &+ (BC - AD - BD) \cdot U_2(x) + (BC - AD - BD) \cdot U_3(x).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Упростим выражение для $\frac{d^2U_1(x)}{dx^2}$, введя замены: $E_1 = (AC - 2 \cdot BD)$ и $E_2 = E_3 = (BC - AD - BD)$, получим:

$$\frac{d^2U_1(x)}{dx^2} = E_1 \cdot U_1(x) + E_2 \cdot U_2(x) + E_2 \cdot U_3(x). \tag{9}$$

Продифференцируем два раза полученное равенство (9) по переменной x , подставим значения производных (6) и упростим полученное выражение:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^4U_1(x)}{dx^4} &= ((AE_1 + 2BE_2)C - 2(AE_2 + BE_2 + BE_1)D) \cdot U_1(x) + ((AE_2 + BE_2 + BE_1)C - \\
 &- (AE_1 + 2BE_2)D - (AE_2 + BE_2 + BE_1)D) \cdot U_2(x) + ((AE_2 + BE_2 + BE_1)C - (AE_1 + 2BE_2)D - \\
 &- (AE_2 + BE_2 + BE_1)D) \cdot U_3(x).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Обозначим множители уравнения (10):

$$G_1 = (AE_1 + 2BE_2)C + 2(AE_2 + BE_2 + BE_1)D; \tag{11}$$

$$G_2 = (AE_2 + BE_2 + BE_1)C - (AE_2 + BE_2 + BE_1)D - (AE_1 + 2BE_2)D. \tag{12}$$

Тогда

$$\frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} = G_1 \cdot U_1(x) + G_2 \cdot U_2(x) + G_2 \cdot U_3(x). \quad (13)$$

Образуюем систему из уравнений производных четвертого и второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} = G_1 \cdot U_1(x) + G_2 \cdot U_2(x) + G_2 \cdot U_3(x); \\ \frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} = E_1 \cdot U_1(x) + E_2 \cdot U_2(x) + E_2 \cdot U_3(x). \end{cases} \quad (14)$$

Так как коэффициенты при $U_2(x)$ и $U_3(x)$ в первом и втором уравнениях системы (14) равны, то переменные при $U_2(x)$ и $U_3(x)$ можно исключить, умножив обе части первого уравнения системы (14) на множитель E_2 , а второго – на множитель G_2 :

$$\begin{cases} E_2 \frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} = G_1 E_2 \cdot U_1(x) + G_2 E_2 \cdot U_2(x) + G_2 E_2 \cdot U_3(x); \\ G_2 \frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} = E_1 G_2 \cdot U_1(x) + E_2 G_2 \cdot U_2(x) + E_2 G_2 \cdot U_3(x). \end{cases} \quad (15)$$

Вычитая из первого уравнения системы (15) второе, получаем:

$$E_2 \frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} - G_2 \frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} = (E_2 G_1 - E_1 G_2) \cdot U_1(x). \quad (16)$$

Уравнение (16) – линейное однородное дифференциальное уравнение четвертого порядка с постоянными коэффициентами.

Перепишем уравнение (16) в виде:

$$E_2 \frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} - G_2 \frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} - (E_2 G_1 - E_1 G_2) \cdot U_1(x) = 0. \quad (17)$$

Для рассматриваемого случая решение можно записать в виде уравнения:

$$\frac{d^4 U_1(x)}{dx^4} - p \frac{d^2 U_1(x)}{dx^2} - q \cdot U_1(x) = 0, \quad (18)$$

где $p = -\frac{G_2}{E_2}$; $q = \frac{-G_1 E_2 + G_2 E_1}{E_2}$.

Характеристическое уравнение выражения (18) имеет вид:

$$k^4 + pk^2 + q = 0. \quad (19)$$

Корни данного характеристического уравнения таковы:

$$k^2 = -\frac{p}{2} \pm \frac{\sqrt{p^2 - 4q}}{2}; \quad (20)$$

$$k^2 = -\frac{G_2 \pm \sqrt{G_2^2 + 4E_2(E_2 G_1 - E_1 G_2)}}{2E_2}; \quad (21)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{G_2 + \sqrt{G_2^2 + 4E_2(E_2 G_1 - E_1 G_2)}}{2E_2}}; \quad (22)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{G_2 - \sqrt{G_2^2 + 4E_2(E_2G_1 - E_1G_2)}}{2E_2}}. \quad (23)$$

Общее решение системы (15) запишется в виде:

$$U_1(x) = p_1 \cdot e^{k_1 \cdot x} + p_2 \cdot e^{-k_1 \cdot x} + p_3 \cdot e^{k_2 \cdot x} + p_4 \cdot e^{-k_2 \cdot x}. \quad (24)$$

Аналогично найдем решение для уравнения системы (6):

$$\frac{dI_1(x)}{dx} = -C \cdot U_1(x) + D \cdot U_2(x) + D \cdot U_3(x). \quad (25)$$

Общее решение для четвертого уравнения системы (6):

$$I_1(x) = q_1 \cdot e^{k_1 \cdot x} + q_2 \cdot e^{-k_1 \cdot x} + q_3 \cdot e^{k_2 \cdot x} + q_4 \cdot e^{-k_2 \cdot x}. \quad (26)$$

Перепишем выражение (8) в виде:

$$E_2(U_2(x) + U_3(x)) = \frac{d^2U_1(x)}{dx^2} - E_1 \cdot U_1(x). \quad (27)$$

Подставляя уравнение (24) в (27), получаем:

$$E_2(U_2(x) + U_3(x)) = -E_1(p_1 \cdot e^{-k_1 x} + p_2 \cdot e^{k_1 x} + p_3 \cdot e^{-k_2 x} + p_4 \cdot e^{k_2 x}) + \frac{d^2(p_1 \cdot e^{-k_1 x} + p_2 \cdot e^{k_1 x} + p_3 \cdot e^{-k_2 x} + p_4 \cdot e^{k_2 x})}{dx^2}. \quad (28)$$

Преобразуем уравнение (28): раскрыв производные и разделив обе части на E_2 , получим уравнение вида:

$$U_2(x) + U_3(x) = \left(-\frac{E_1 + k_1^2}{E_2}\right) p_1 \cdot e^{-k_1 x} + \left(-\frac{E_1 + k_1^2}{E_2}\right) p_2 \cdot e^{k_1 x} + \left(-\frac{E_1 + k_2^2}{E_2}\right) p_3 \cdot e^{-k_2 x} + \left(-\frac{E_1 + k_2^2}{E_2}\right) p_4 \cdot e^{k_2 x}. \quad (29)$$

Введем следующие обозначения:

$$p_3 = p_3 \left(-\frac{E_1 + k_2^2}{E_2}\right); \quad (30)$$

$$p_4 = p_4 \left(-\frac{E_1 + k_2^2}{E_2}\right); \quad (31)$$

$$\eta_1 = \frac{E_2}{k_2^2 - E_1}. \quad (32)$$

Для расчета значений тока имеем:

$$N_2 \cdot (I_2(x) + I_3(x)) = -N_1 \cdot I_1(x) + \frac{d^2I_1(x)}{dx^2}, \quad (33)$$

где $N_1 = AC - 2 \cdot BD$; $N_2 = BC - AD - BD$.

Распишем выражение (33), подставляя полученные решения (27):

$$N_2 \cdot (I_2(x) + I_3(x)) = -N_1(q_1 \cdot e^{-k_1 x} + q_2 \cdot e^{k_1 x} + q_3 \cdot e^{-k_2 x} + q_4 \cdot e^{k_2 x}) + \frac{d^2(q_1 \cdot e^{-k_1 x} + q_2 \cdot e^{k_1 x} + q_3 \cdot e^{-k_2 x} + q_4 \cdot e^{k_2 x})}{dx^2}. \quad (34)$$

Возьмем вторую производную по переменной x и разделим обе части уравнения (34) на K_2 , получим выражение:

$$I_2(x) + I_3(x) = \frac{-N_1 + k_1^2}{N_2} q_1 e^{-k_1 x} + \frac{-N_1 + k_1^2}{N_2} q_2 e^{k_1 x} + \frac{-N_1 + k_2^2}{N_2} q_3 e^{-k_2 x} + \frac{-N_1 + k_2^2}{N_2} q_4 e^{k_2 x}. \quad (35)$$

Представим следующие замены:

$$p_3 = p_3 \left(-\frac{N_1 + k_2^2}{N_2} \right); \quad (36)$$

$$p_4 = p_4 \left(-\frac{N_1 + k_2^2}{N_2} \right); \quad (37)$$

$$\eta_2 = -\frac{N_2}{k_2^2 - N_1}. \quad (38)$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} U_1(x) = p_1 \cdot e^{-k_1 x} + p_2 \cdot e^{k_1 x} + \eta_1 (p_3 \cdot e^{-k_2 x} + p_4 \cdot e^{k_2 x}); \\ U_2(x) + U_3(x) = \eta_2 (p_1 \cdot e^{-k_1 x} + p_2 \cdot e^{k_1 x}) + p_3 \cdot e^{-k_2 x} + p_4 \cdot e^{k_2 x}; \\ I_1(x) = q_1 \cdot e^{-k_1 x} + q_2 \cdot e^{k_1 x} - \eta_1 (q_3 \cdot e^{-k_2 x} + q_4 \cdot e^{k_2 x}); \\ I_2(x) + I_3(x) = -\eta_1 (q_1 \cdot e^{-k_1 x} + q_2 \cdot e^{k_1 x}) + q_3 \cdot e^{-k_2 x} + q_4 \cdot e^{k_2 x}. \end{cases} \quad (39)$$

Выразим постоянные q_1, q_2, q_3, q_4 в зависимости от p_1, p_2, p_3, p_4 . Для этого подставим полученные значения $U_1(x), (U_2(x) + U_3(x)), I_1(x)$ и $(I_2(x) + I_3(x))$ в начальные уравнения (1):

$$-\frac{dU_1(x)}{dx} = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1(x) + j\omega M \cdot (I_2(x) + I_3(x)); \quad (40)$$

$$-\frac{dU_2(x)}{dx} - \frac{dU_3(x)}{dx} = (R + j\omega L + j\omega M)(I_2(x) + I_3(x)) + j\omega M \cdot I_1(x). \quad (41)$$

После приведения подобных имеем:

$$\begin{aligned} k_1 \cdot p_1 \cdot e^{-k_1 x} - k_1 \cdot p_2 \cdot e^{k_1 x} + \eta_1 \cdot k_2 \cdot p_3 \cdot e^{-k_2 x} - \eta_1 \cdot k_2 \cdot p_4 \cdot e^{k_2 x} = (R + j\omega L - j\omega M \cdot \eta_1) \cdot q_1 \cdot e^{-k_1 x} + \\ + (R + j\omega L - j\omega M \cdot \eta_1) \cdot q_2 \cdot e^{k_1 x} + (-\eta_2(R + j\omega L) - j\omega M) \cdot q_3 \cdot e^{-k_2 x} + \\ + (-\eta_2(R + j\omega L) - j\omega M) \cdot q_4 \cdot e^{k_2 x}. \end{aligned} \quad (42)$$

Сравнивая левые и правые части выражения (42), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} k_1 p_1 = (R + j\omega L - j\omega M \cdot \eta_1) \cdot q_1; \\ -k_1 p_2 = (R + j\omega L - j\omega M \cdot \eta_1) \cdot q_2; \\ \eta_1 \cdot k_2 p_3 = (-\eta_2(R + j\omega L) + j\omega M) \cdot q_3; \\ -\eta_1 \cdot k_2 p_4 = (-\eta_2(R + j\omega L) + j\omega M) \cdot q_4. \end{cases} \quad (43)$$

Подставим значения из системы (39) в уравнение (41):

$$-\frac{dU_2(x)}{dx} - \frac{dU_3(x)}{dx} = (R + j\omega L + j\omega M)(-\eta_1(q_1 e^{-k_1 x} + q_2 e^{k_1 x}) + q_3 e^{-k_2 x} + q_4 e^{k_2 x}) + 2j\omega M(q_1 e^{-k_1 x} + q_2 e^{k_1 x} - \eta_2(q_3 e^{-k_2 x} + q_4 e^{k_2 x})). \quad (44)$$

Продифференцировав левую часть уравнения (44), получим:

$$k_1 \eta_2 p_1 e^{-k_1 x} - k_1 \eta_2 p_2 e^{k_1 x} + k_2 p_3 e^{-k_2 x} - k_2 p_4 e^{k_2 x} = (-\eta_1(R + j\omega L + j\omega M) + 2j\omega M) \cdot q_1 e^{-k_1 x} + (-\eta_1(R + j\omega L + j\omega M) + 2j\omega M) \cdot q_2 e^{k_1 x} + (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 \cdot j\omega M) \cdot q_3 e^{-k_2 x} + (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 \cdot j\omega M) \cdot q_4 e^{k_2 x}. \quad (45)$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \eta_1 k_1 p_1 = (-\eta_1(R + j\omega L - j\omega M) + 2j\omega M) \cdot q_1; \\ -\eta_1 k_1 p_2 = (-\eta_1(R + j\omega L - j\omega M) + 2j\omega M) \cdot q_2; \\ k_2 p_3 = (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 \cdot j\omega M) \cdot q_3; \\ -k_2 p_4 = (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 \cdot j\omega M) \cdot q_4. \end{cases} \quad (46)$$

Из уравнений систем (43) и (46) составим систему:

$$\begin{cases} k_1 p_1 = (R + j\omega L - j\omega M \eta_1) \cdot q_1; \\ -k_1 p_2 = (R + j\omega L - j\omega M \eta_1) \cdot q_2; \\ k_2 p_3 = (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 j\omega M) \cdot q_3; \\ -k_2 p_4 = (R + j\omega L + j\omega M - 2\eta_2 j\omega M) \cdot q_4. \end{cases} \quad (47)$$

Введем обозначения:

$$Z_a = \frac{R + j\omega L - j\omega M \eta_1}{k_1}; \quad (48)$$

$$Z_b = \frac{R + j\omega(L + M - 2\eta_2 M)}{k_2}. \quad (49)$$

Тогда $q_1 = \frac{p_1}{Z_a}$; $q_2 = \frac{-p_2}{Z_a}$; $q_3 = \frac{p_3}{Z_b}$; $q_4 = \frac{-p_4}{Z_b}$.

Подставим q_1, q_2, q_3 и q_4 в уравнения системы (39):

$$\begin{cases} U_1(x) = p_1 e^{-k_1 x} + p_2 e^{k_1 x} + \eta_1(p_3 e^{-k_2 x} + p_4 e^{k_2 x}); \\ U_2(x) + U_3(x) = \eta_2(p_1 e^{-k_1 x} + p_2 e^{k_1 x}) + p_3 e^{-k_2 x} + p_4 e^{k_2 x}; \\ I_1(x) = \frac{1}{Z_a} p_1 e^{-k_1 x} - \frac{1}{Z_a} p_2 e^{k_1 x} - \eta_2 \left(\frac{1}{Z_b} p_3 e^{-k_2 x} + \frac{1}{Z_b} p_4 e^{k_2 x} \right); \\ I_2(x) + I_3(x) = -\eta_1 \left(\frac{1}{Z_a} p_1 e^{-k_1 x} - \frac{1}{Z_a} p_2 e^{k_1 x} \right) + \frac{1}{Z_b} p_3 e^{-k_2 x} - \frac{1}{Z_b} p_4 e^{k_2 x}. \end{cases} \quad (50)$$

Выразим p_1, p_2, p_3, p_4 из приведенных выше решений $U_1(x), U_2(x), U_3(x), I_1(x), I_2(x), I_3(x)$ через начальные значения напряжения и тока при $x = 0$:

$$\begin{cases} U_1(0) = p_1 + p_2 + \eta_1(p_3 + p_4); \\ U_2(0) + U_3(0) = \eta_2(p_1 + p_2) + p_3 + p_4; \\ I_1(0) = \frac{1}{Z_a} p_1 - \frac{1}{Z_a} p_2 - \eta_2 \left(\frac{1}{Z_b} p_3 + \frac{1}{Z_b} p_4 \right); \\ I_2(0) + I_3(0) = -\eta_1 \left(\frac{1}{Z_a} p_1 - \frac{1}{Z_a} p_2 \right) + \frac{1}{Z_b} p_3 - \frac{1}{Z_b} p_4. \end{cases} \quad (51)$$

Вычтем из первого уравнения системы (51) второе, умножив его на η_1 :

$$U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) = (p_1 + p_2)(1 - \eta_1\eta_2). \quad (52)$$

Следовательно, из выражения (52) можно получить:

$$p_1 + p_2 = \frac{U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0))}{1 - \eta_1\eta_2}. \quad (53)$$

Для расчета тока умножим четвертое уравнение системы (51) на η_2 и сложим его с третьим:

$$I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0)) = \frac{1}{Z_a}(p_1 - p_2) - \frac{\eta_1\eta_2}{Z_a}(p_1 - p_2); \quad (54)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{Z_a \cdot I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0)) \cdot Z_a}{1 - \eta_1\eta_2}. \quad (55)$$

Выразим p_2 через p_1 :

$$p_2 = p_1 - \frac{Z_a \cdot I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0)) \cdot Z_a}{1 - \eta_1\eta_2}. \quad (56)$$

Следовательно, подставляя выражение (56) в (54), получим:

$$p_1 = \frac{U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a \cdot I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0)) \cdot Z_a}{2(1 - \eta_1\eta_2)}. \quad (57)$$

Выражение (57) подставим в (56) и результат подстановки приведем к общему знаменателю:

$$p_2 = \frac{U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))}{2(1 - \eta_1\eta_2)}. \quad (58)$$

Для вычисления p_3 и p_4 умножим первое уравнение системы (51) на η_2 и вычтем из второго:

$$(U_2(0) + U_3(0)) - \eta_2 \cdot U_1(0) = (p_3 + p_4)(1 + \eta_1\eta_2); \quad (59)$$

$$p_3 + p_4 = \frac{U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0)}{1 - \eta_1\eta_2}. \quad (60)$$

Умножим третье уравнение системы (51) на η_1 и сложим его с четвертым:

$$p_3 - p_4 = Z_b \frac{I_2(0) + I_3(0) + \eta_1 I_1(0)}{1 - \eta_1\eta_2}. \quad (61)$$

Из выражений (60) и (61) определим p_3, p_4 :

$$p_3 = \frac{U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)}{2(1 - \eta_1\eta_2)}; \quad (62)$$

$$p_4 = \frac{U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}. \quad (63)$$

Подставим полученные результаты в уравнения системы (50):

$$\begin{aligned} U_1(x) = & \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}; \end{aligned} \quad (64a)$$

$$\begin{aligned} U_2(x) + U_3(x) = & \eta_2 \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \eta_2 \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}; \end{aligned} \quad (64б)$$

$$\begin{aligned} I_1(x) = & \frac{1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\ & - \frac{1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\ & - \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}; \end{aligned} \quad (64B)$$

$$\begin{aligned} I_2(x) - I_3(x) = & - \frac{\eta_1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{\eta_1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\ & + \frac{1}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\ & - \frac{1}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}. \end{aligned} \quad (64r)$$

Аналогично производится расчет для второй и третьей линий. В результате получаем систему, описывающую распределение тока и потенциалов в системе трех одинаковых одно-проводных линий с учетом их взаимного влияния:

$$\begin{aligned}
 U_1(x) = & \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{65a}$$

$$\begin{aligned}
 U_2(x) = & \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) + Z_a I_2(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) - Z_a I_2(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) + Z_b(I_1(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) - Z_b(I_1(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{65б}$$

$$\begin{aligned}
 U_3(x) = & \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) + Z_a I_3(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) - Z_a I_3(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) + Z_b(I_1(0) + I_2(0)) + Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) - Z_b(I_1(0) + I_2(0)) - Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{65в}$$

$$\begin{aligned}
 I_1(x) = & \frac{1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{1}{Z_a} \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{65г}$$

$$\begin{aligned}
 I_2(x) = & \frac{1}{Z_a} \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) + Z_a I_2(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{1}{Z_a} \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) - Z_a I_2(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) + Z_b(I_1(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) - Z_b(I_1(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{65д}$$

$$\begin{aligned}
 I_3(x) = & \frac{1}{Z_a} \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) + Z_a I_3(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{1}{Z_a} \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) - Z_a I_3(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) + Z_b(I_1(0) + I_2(0)) + Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) - Z_b(I_1(0) + I_2(0)) - Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}.
 \end{aligned} \tag{65е}$$

Преобразуем выражения (65а) и (65в) к виду:

$$\begin{aligned}
 U_1(x)(1 - \eta_1 \eta_2) = & (U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0))) \cdot \frac{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x}}{2} - \\
 & - Z_a(I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot \frac{e^{k_1 x} - e^{-k_1 x}}{2} + \\
 & + \eta_1(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0)) \cdot \frac{e^{k_2 x} + e^{-k_2 x}}{2} - \\
 & - Z_b \eta_1(I_2(0) + I_3(0) + \eta_1 I_1(0)) \cdot \frac{e^{k_2 x} - e^{-k_2 x}}{2};
 \end{aligned} \tag{66а}$$

$$\begin{aligned}
 I_1(x)(1 - \eta_1 \eta_2) = & -\frac{1}{Z_a}(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0))) \cdot \frac{e^{k_1 x} - e^{-k_1 x}}{2} + \\
 & + (I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot \frac{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x}}{2} + \\
 & + \frac{\eta_2}{Z_b}(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0)) \cdot \frac{e^{k_2 x} - e^{-k_2 x}}{2} - \\
 & - \eta_2(I_2(0) + I_3(0) + \eta_1 I_1(0)) \cdot \frac{e^{k_2 x} + e^{-k_2 x}}{2}.
 \end{aligned} \tag{66б}$$

Так как

$$\frac{e^{k_1 x} - e^{-k_1 x}}{2} = \text{sh}(k_1 x); \quad \frac{e^{k_1 x} + e^{-k_1 x}}{2} = \text{ch}(k_1 x); \quad \frac{e^{k_2 x} - e^{-k_2 x}}{2} = \text{sh}(k_2 x); \quad \frac{e^{k_2 x} + e^{-k_2 x}}{2} = \text{ch}(k_2 x),$$

перепишем выражения (66а) и (66б) с вводом гиперболических функций:

$$\begin{cases} U_1(x)(1 - \eta_1\eta_2) = U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) \cdot \operatorname{ch}(k_1x) - Z_a(I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot \\ \cdot \operatorname{sh}(k_1x) + \eta_1(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2U_1(0)) \cdot \operatorname{ch}(k_2x) - Z_b\eta_1(I_2(0) + I_3(0) + \eta_1I_1(0)) \cdot \operatorname{sh}(k_2x); \\ I_1(x)(1 - \eta_1\eta_2) = -\frac{1}{Z_a}(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) \cdot \operatorname{sh}(k_1x) + (I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot \\ \cdot \operatorname{ch}(k_1x) + \frac{\eta_2}{Z_b}(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2U_1(0)) \cdot \operatorname{sh}(k_2x) - \eta_2(I_2(0) + I_3(0) + \eta_1I_1(0))) \cdot \operatorname{ch}(k_2x). \end{cases} \quad (67)$$

Подставим в систему (67) замены:

$$U_{1н} = \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)))}{(1 - \eta_1\eta_2)}; \quad (68)$$

$$I_{1н} = \frac{(I_1(0) + \eta_2(I_2(0) + I_3(0)))}{(1 - \eta_1\eta_2)}; \quad (69)$$

$$U_{1н}' = \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2U_1(0))}{(1 - \eta_1\eta_2)}; \quad (70)$$

$$I_{1н}' = \frac{(I_2(0) + I_3(0) + \eta_1I_1(0))}{(1 - \eta_1\eta_2)}; \quad (71)$$

тогда получим:

$$\begin{cases} U_1(x) = U_{1н} \cdot \operatorname{ch}(k_1x) - Z_a \cdot I_{1н} \cdot \operatorname{sh}(k_1x) + \eta_1 U_{1н}' \cdot \operatorname{ch}(k_2x) - Z_b \eta_1 I_{1н}' \cdot \operatorname{sh}(k_2x); \\ I_1(x) = -\frac{1}{Z_a} \cdot U_{1н} \cdot \operatorname{sh}(k_1x) + I_{1н} \cdot \operatorname{ch}(k_1x) + \frac{\eta_2}{Z_b} \cdot U_{1н}' \cdot \operatorname{sh}(k_2x) - \eta_2 \cdot I_{1н}' \cdot \operatorname{ch}(k_2x). \end{cases} \quad (72)$$

Выражения системы (72) схожи по структуре с уравнениями для двухпроводной линии [1], что подтверждает соответствие полученных формул системы (72) физическим процессам, происходящим в линии.

В качестве примера приведем расчет для жил кабеля АПвАШв 3×95 с известными параметрами и значениями напряжения и тока в начале линии длиной 10 км на частоте 50 Гц: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,285 \text{ Ом/км}$; $L_1 = L_2 = L_3 = 4,99 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/км}$; $G_1 = G_2 = G_3 = 6,31 \cdot 10^{-9} \text{ Сим/км}$; $C_1 = C_2 = C_3 = 1,004 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/км}$; $G_{12} = G_{13} = G_{23} = G_{21} = G_{31} = G_{32} = 7,18 \cdot 10^{-10} \text{ Сим/км}$; $C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{21} = C_{31} = C_{32} = 1,14 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/км}$; $M_{12} = M_{13} = M_{23} = M_{21} = M_{31} = M_{32} = 3,53 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/км}$.

Значения напряжения в начале линии: $U_1(0) = 10^4 e^{j0} \text{ В}$; $U_2(0) = 10^4 e^{j(\frac{2\pi}{3})} \text{ В}$; $U_3(0) = 10^4 e^{j(\frac{4\pi}{3})} \text{ В}$.

Значения тока в начале линии: $I_1(0) = 120 e^{j\varphi} \text{ А}$; $I_2(0) = 120 e^{j(\frac{2\pi}{3} + \varphi)} \text{ А}$; $I_3(0) = 120 e^{j(\frac{4\pi}{3} + \varphi)} \text{ А}$,

где φ – фаза входного сопротивления линии.

По выражениям (72) в среде Mathcad рассчитано распределение тока и напряжения по длине линии, результаты расчетов приведены на рисунке 2.

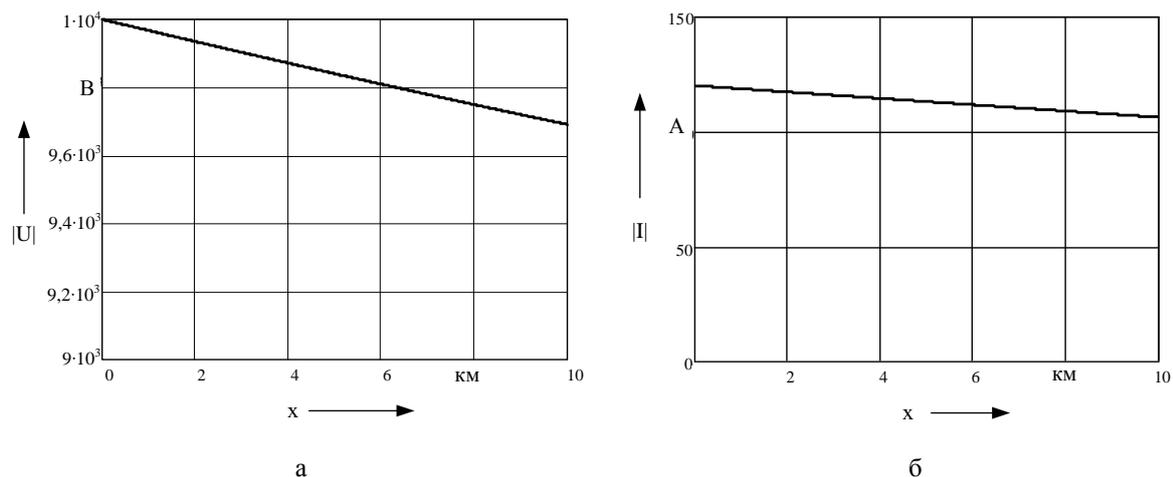


Рисунок 2 – Распределение напряжения (а) и тока (б) по длине линии

Из графиков на рисунке 2 видно, что напряжение по длине линии практически не меняется. Уменьшение тока по длине линии обусловлено его утечкой в землю и электромагнитной связью между жилами кабеля.

Полученные в ходе расчета формулы могут быть использованы для определения напряжения и тока в системе трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния при известных первичных и взаимных параметрах линий.

Список литературы

1. Коваленков, В. И. Взаимное влияние линий [Текст] // Научно-технический сборник. Л.-М. Гос. изд-во по технике связи, 1935. – Вып.10. – С. 48 – 54.
2. Ерита, А. М. Распределение токов и потенциалов в системе двух изолированных проводников с учетом их взаимного влияния [Текст] / А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосиб. гос. акад. вод. трансп. – Новосибирск. – 2010. – № 1. – С. 339 – 345.
3. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений системы электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.

УДК 629.424.14.004:621.436

В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА РАЗНЫХ СОРТАХ ТОПЛИВА

Выполнен теоретический анализ движения жидкого топлива в линии низкого давления (ЛНД) систем топливоподачи дизельных двигателей. Предложено использовать для расчетов ЛНД систему уравнений для гомогенной смеси (по С. С. Кутателадзе). Показано, что при использовании в тепловозных и судовых дизелях альтернативных видов топлива необходима перерегулировка топливной аппаратуры, а в качестве диагностического параметра целесообразно оперировать степенью неравномерности рабочего процесса.

Тенденция к форсированию тепловозных и судовых дизелей по среднему эффективному давлению за счет наддува приводит к необходимости увеличения расхода топлива в линиях низкого давления при сохранении основных конструктивных размеров дизелей.

С другой стороны, практика эксплуатации и опыт [1, 2] показывают, что реальный процесс наполнения надплунжерного пространства топливного насоса высокого давления (ТНВД) тепловозных и судовых дизелей является нестационарным. При этом уровень давления и скорости в различных сечениях топливного коллектора (ТК) и всей ЛНД в период рабочего цикла неодинаков, непрерывно изменяется и может существенно отличаться от усредненных значений. Неустойчивый характер течения топлива в ТК и ЛНД определяется в основном тремя причинами: разгоном потока топлива в период быстрого открытия наполнительных окон втулок плунжеров, выталкиванием топлива в период нагнетающего хода плунжера и истечением топлива через отсечные окна. Возможно влияние в ЛНД волн давления от работы автономного топливоподкачивающего насоса, а также влияние физических свойств жидкого топлива (вязкости, сжимаемости, плотности), значения которых могут существенно различаться для альтернативных видов топлива (таблицы 1 и 2) [1 – 8]. Взаимодействие указанных процессов приводит к возникновению колебаний давления и скорости, к разрывам сплошности потока, к увеличению степени неравномерности наполнения надплунжерного пространства и к ухудшению экономичности работы дизеля [2 – 4].

Известно, что любому реальному процессу, в том числе процессу движения топлива в топливопроводах транспортных дизелей, присущи случайные флуктуации. Однако выбор детерминированной или вероятностной математической модели для описания процесса движения топлива в ЛНД зависит от того, учитываются ли случайные факторы. Если хотя бы один параметр модели или ограничительная функция имеет в качестве своих значений случайный вектор или случайную величину, то это случайная модель [1, 4].

С повышением скорости потока топлива в ТК при увеличении нагрузки дизеля может качественно меняться механизм его движения. Ламинарный режим постепенно переходит в турбулентный. Мгновенные значения скорости и давления в ЛНД становятся функциями времени, причем характер временной зависимости от функционального постепенно переходит к случайному.

Скорость и давление потока в фиксированной точке ЛНД изменяются тогда уже по случайному закону в окрестности средней величины. Анализ выполненных экспериментальных исследований, а также наши исследования [9, 10] изменения давления во всасывающих полостях разных ТНВД дизелей различных типов подтверждают изложенное выше [1 – 7]. На рисунке 1 кривая 1 соответствует изменению давления до фильтра, а кривая 2 – после фильтра грубой очистки топлива [2].

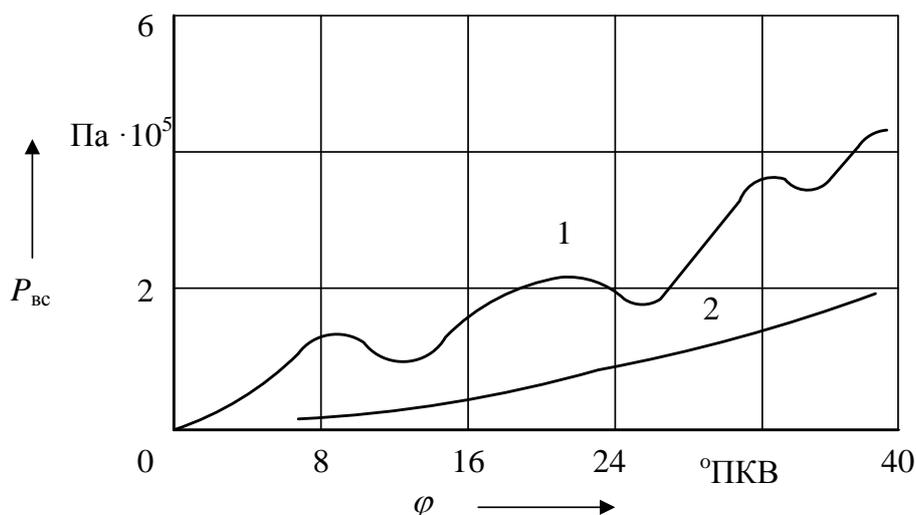


Рисунок 1 – Характер изменения давления топлива до (1) и после (2) фильтра очистки топлива

В первом приближении движение топлива в ЛНД можно принять как неустановившееся одномерное волновое движение сжимаемой невязкой жидкости, которое описывается (по Н. Е. Жуковскому) дифференциальными уравнениями в частных производных [1, 2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \\ \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{a^2 \rho} \frac{\partial P}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где U, P, ρ, t, a, x – соответственно скорость, давление, плотность топлива, время, скорость звука в топливе, координата длины.

Проводя, как принято, перекрестное дифференцирование уравнений (1), можно получить волновые уравнения второго порядка гиперболического типа [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0; \\ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Полученные уравнения (2) характеризуют функции непрерывных аргументов состояния системы. Специфика этой системы заключается в том, что в отличие от систем с сосредоточенными параметрами, характеризующимися обыкновенными дифференциальными уравнениями в частных производных, ЛНД дизеля приближенно описывается дифференциальными уравнениями в частных производных.

Рассмотрим первое волновое уравнение системы (2) относительно давления:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0, \quad t \geq 0, \quad -\infty < x < \infty. \quad (3)$$

Уравнение (3) однозначно определяет колебания давления в ТК, если известны начальные значения давления и координаты, т. е. дано

$$\begin{cases} P(x, 0) = X_1(x); \\ \dot{P}(x, 0) = X_2(x), \end{cases} \quad (4)$$

где $X_1(x)$ и $X_2(x)$ могут быть случайными или детерминированными функциями координаты, входящими в уравнение линейно.

В общем виде решение уравнения (3) при $a = \text{const}$ можно записать в форме Даламбера:

$$P(x, t) = \frac{1}{2} [X_1(x + at) + X_1(x - at)] + \frac{1}{2a} \int_{-at}^{+at} X_2(x + \eta) d\eta, \quad (5)$$

где η – возможное экспериментальное (заданное) значение случайной величины по координате.

В формуле (5) величина $P(x, t)$ представлена явно в виде линейного выражения и содержит случайные составляющие. В условиях дизельного процесса, как показывают специальные исследования, топливо в ЛНД правильнее рассматривать как смесь топлива с воздухом, т. е. как двухфазную среду с малым газосодержанием [1].

Тогда в качестве исходной системы уравнений целесообразно использовать уравнения для гомогенной модели смеси, предложенной С. С. Кутателадзе [1]:

$$\frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{\text{см}}} \frac{\partial P_{\text{см}}}{\partial x} - U_{\text{см}} \frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial x}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{см}}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_{\text{см}}) \rho_{\text{см}}. \quad (7)$$

где $U_{\text{см}}$, $\rho_{\text{см}}$, $P_{\text{см}}$ – соответственно скорость, плотность, давление смеси топлива с воздухом. Значение $\rho_{\text{см}}$ определяется по формуле:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_f (1 - \varepsilon) + \rho_b \varepsilon. \quad (8)$$

где ρ_b , ε – соответственно плотность воздуха и текущее относительное количество воздуха в смеси. Значение ε можно оценить по удельному весу смеси [1].

Уравнение (6) можно выразить в форме:

$$\frac{\partial U_{\text{см}}}{\partial x} = \frac{1}{a^2 \rho_{\text{см}}} \frac{\partial P_{\text{см}}}{\partial t}. \quad (9)$$

Если, как и ранее, продифференцировать уравнение (6) по t , а (9) по x и вычесть результаты, то получим волновое уравнение для $U_{\text{см}}$:

$$\frac{\partial^2 U_{\text{см}}}{\partial t^2} = a_{\text{см}}^2 \frac{\partial^2 U_{\text{см}}}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Если же уравнение (6) продифференцировать по x , а (9) по t и сложить результаты, то получим волновое уравнение для $P_{\text{см}}$:

$$\frac{\partial^2 P_{\text{см}}}{\partial t^2} = a_{\text{см}}^2 \frac{\partial^2 P_{\text{см}}}{\partial x^2}. \quad (11)$$

где $a_{\text{см}}$ – скорость звука в смеси топлива с воздухом.

Для каждого из полученных уравнений для смеси можно проводить преобразования, аналогичные (10) и (11), а общие решения записать также в форме Даламбера.

Важной особенностью перевода дизелей на нетрадиционные (альтернативные) виды топлива является возможность обеспечения требуемых эксплуатационно-технических и названных экологических показателей без изменения конструкции двигателя или при ее незначительных изменениях. Это позволяет организовать работу дизелей не только на традиционных дизельных видах топлива, но и на нетрадиционном топливе (в том числе и на газообразном), т. е. можно обеспечить «всеядность» двигателей. Применение таких двигателей значительно облегчает решение вопросов снабжения транспортных средств топливом в реальных условиях эксплуатации и придает им большую автономность. Такие «всеядные» (многотопливные) двигатели могут быть использованы в различных отраслях: на флоте, в сельском хозяйстве, военной технике, малой энергетике, а также при освоении северных и северо-восточных регионов страны, в районах добычи и переработки нефти, природного газа, газовых конденсатов и попутных нефтяных газов, в высокогорных условиях и т. д. [2 – 7].

Для обеспечения «всеядности» дизелей необходимо организовать процессы топливоподачи, смесеобразования, воспламенения и сгорания топлива с различными свойствами (вязкость, плотность, сжимаемость, фракционный и углеводородный состав) (см. таблицы 1, 2). Значительное влияние на работу дизелей оказывает протекание процесса топливоподачи. При переводе дизелей на нетрадиционные виды топлива может возникнуть проблема корректирования топливоподачи и последующих процессов их воспламенения и сгорания [2, 4, 8, 10]. В частности, при работе дизелей со штатной системой топливоподачи на легком топливе (облегченные нефтяные и альтернативные виды топлива (АВТ), спирты, диметиловый эфир, газовые конденсаты, сжиженный нефтяной газ, водород и др.) наблюдаются уменьшение массового часового расхода топлива и соответствующее снижение мощности двигателя, увеличение периода задержки воспламенения [2, 4, 6, 8, 10].

Таблица 1 – Основные физико-химические показатели газотурбинных видов топлива, применяемых в различных организациях [2]

Показатели топлива	Газотурбинное топливо			Пароходства и организации			
	фактически используемое в опытах на судах иртышского речного пароходства (ИРПа)	ГОСТ 10433-75, I сорт	ГОСТ 10433-75, II сорт	Черноморское морское пароходство	Северо-Западное речное пароходство	Камское речное пароходство	ЦНИИ МФ
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,835	0,935	0,935	0,893	0,852	0,843	0,936 – 0,88
Вязкость условная при 50 °С, град. ВУ	1,14	н.б. 1,6	н.б. 3,0	1,18	1,13	1,3	1,64 – 1,98
Содержание веществ, %:							
зольность	0,02	0,01	0,01	0,015	–	–	Отс.
ванадий	0,0004	0,0005	0,004	0,0007	–	–	–
сера	1,1	1,8	2,5	2,65	0,87	1,5	0,19 – 0,03
механические примеси	отс.	0,02	0,03	0,024	0,03	–	0,024
смолистые вещества	5	–	–	16	–	6	0,024
вода	отс.	0,1	0,5	–	–	–	Отс.
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	65	65	61	76	62	88	60
Температура застывания, °С	–12	5	5	5	–5	–12	–17
Теплота сгорания низшая, кДж/кг	40500	39800	39800	–	–	–	–
Йодное число, 1 г йода на 100 г топлива	–	–	45	–	–	–	–
Коксуемость, %	–	0,2	0,5	–	–	–	–

Поэтому разработка мероприятий, позволяющих переоборудовать тепловозные, судовые и другие транспортные дизели существующих конструкций для использования на различных видах топлива, является одним из путей решения топливной проблемы. Целесообразность таких мероприятий вытекает из имеющегося опыта работы с серийными двигателями без каких-либо изменений в их камере сгорания и топливной аппаратуре на топливе, химические и физические свойства которого могут варьироваться в пределах, регламентируемых нормальным протеканием рабочего процесса. Это направление имеет определенные преимущества, которые заключаются в относительно малых сроках и сравнительно небольшой стоимости работ, связанных с переводом дизелей на различные виды топлива [3, 7, 10].

Вместе с тем для сокращения трудоемкости и объемов доводочных работ целесообразна разработка методов численной инженерной оценки параметров процесса сгорания в период теплотехнических испытаний. Комплексное же исследование работы дизеля, переводимого на другой сорт топлива, должно быть дополнено результатами анализа неравномерности последовательных рабочих циклов в цилиндре, что является содержательным описанием системных процессов в камере сгорания (КС).

Выполненные исследования и практика эксплуатации показывают, что среднеоборотные дизели (СОДы), работающие на различных сортах топлива, имеют неоднозначные показатели рабочего процесса [2, 6, 7, 9, 10].

Необходимость дополнительной регулировки топливной аппаратуры в этом случае приводит к изменению расхода топлива, максимального давления сгорания P_z , температуры выпускных газов T_z и других параметров. В соответствии с правилами технической эксплуатации судовых и тепловозных СОДов на номинальном режиме отклонения параметров рабоче-

го процесса для всех цилиндров не должны превышать (от среднего значения) $\pm 5\%$ для P_z и $\pm 6\%$ для T_z .

Таблица 2 – Физико-химические свойства дизельного и некоторых альтернативных видов топлива [5]

Физико-химические свойства топлива	Топливо						
	ДТ	КПГ (метан)	СНГ (пропан)	метанол	ДМЭ	РМ	МЭ РМ
Формула состава	$C_{16,2}H_{28,5}^*$	CH_4	C_3H_8	CH_3OH	CH_3OCH_3	-	$C_{19,6}H_{36,6}O_2^*$
Плотность при 20 °С ρ_{20} , кг/м ³	830	416**	490**	795	668**	916	877
Вязкость кинематическая при 20 °С ν_{20} , мм ² /с	3,8	-	0,17**	0,55	0,22**	75	8
Коэффициент поверхностного натяжения σ при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	-	-	12,5	33,2	30,7
Теплота сгорания низшая H_u , МДж/кг	42,5	50,3	46,5	20,1	28,9	37,3	37,8
Цетановое число	45	3	16	3	55–60	36	48
Температура самовоспламенения, °С	250	540	487	464	235	318	230
Температура помутнения, °С	-25	-	-	-	-	-9	-13
Температура застывания, °С	-35	-	-	-97,9	-	-20	-21
Температура кипения, °С	180 – 360	-161,5	-42	64,5	-25	-	-
Теплота испарения при температуре кипения, кДж/кг	250	511	427	1115	467	-	-
Давление насыщенных паров при 0,1 МПа и 20 °С, МПа	-	21,4	0,84	0,013	0,51	-	-
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	17,2	15,7	6,4	9,0	12,5	12,6
Содержание, % по массе:							
С	87,0	76,0	81,8	37,5	52,2	77,0	77,5
Н	12,6	24,0	18,2	12,5	13,0	12,0	12,0
О	0,4	0	0	50,0	34,8	11,0	10,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	-	0,015	-	-	0,002	0,002
Коксуемость 10%-ного остатка, % по массе	0,2	-	-	-	-	0,4	0,3

Примечание: «-» – свойства не определялись; * – условная формула состава; ** – плотность и вязкость жидкой фазы; ДТ – дизельное топливо; КПГ – компримированный природный газ; СНГ – сжиженный нефтяной газ; ДМЭ – диметиловый эфир; РМ – рапсовое масло; МЭ РМ – метиловый эфир рапсового масла.

Определение степени неравномерности рабочего процесса (изменение давления от цикла к циклу) среднеоборотного транспортного и судового дизеля типа 4Ч17,5/24 проводилось по нагрузочной характеристике при работе на стандартном дизельном и газотурбинном (ГОСТ 10433-82, марка ТГВК) топливе при различной регулировке топливной аппаратуры [2, 7, 10].

С увеличением нагрузки на обоих сортах топлива индикаторные показатели существенно изменяются, однако степень их изменения различна [1, 10]. Так, рабочий процесс дизеля 4Ч17,5/24 на газотурбинном топливе [9, 10] сопровождается изменением индикаторных показателей: параметров P_z и максимальной скорости нарастания давления $(dP/d\varphi)_{max}$.

Результаты испытаний показали, что на степень неравномерности рабочего процесса влияет не только регулировка топливной аппаратуры (угол опережения впрыска $\theta_{оп}$ и давление начала подъема иглы форсунки P_{ϕ}), но и сорт топлива. В настоящей работе для оценки этого параметра был выбран метод, предложенный академиком Б. С. Стечкиным.

Степень неравномерности рабочего процесса [2]

$$\delta = \frac{\sum_1^m [(P_z - P_n) - P_{cp}]}{mP_{cp}}, \quad (12)$$

где P_z , P_n , P_{cp} , m – соответственно максимальное давление сгорания, давление «чистого сжатия», среднее значение давления горения и число ординат давления, выбранное для определения δ . Причем

$$P_{cp} = \frac{\sum_1^m P_z}{m} - P_n. \quad (13)$$

Для определения числа ординат давления был использован выборочный метод. При этом принято, что распределение случайной величины P_z описывается нормальным законом [1, 9]. Тогда объем выборки определяется по зависимости:

$$m = \frac{t^2 \sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (14)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение совокупности; i – показатель достоверности для заданной доверительной вероятности β ; ε – дозволённая ошибка выборочной средней совокупности ординат давления. Значение σ определялось с использованием правил «трех сигм» и составило 0,223. Дозволённая ошибка определения P_z в соответствии с принятой методикой тарировки индикатора равнялась 0,1 МПа. Для доверительной вероятности $\beta = 0,95$ значение t составило 1,96 [2].

Тогда значение объема выборки m , рассчитанное по формуле (14), составило 16.

Методика и аппаратное обеспечение экспериментов описаны в работах [8 – 10].

В таблице 3 представлены результаты экспериментальных и рассчитанных по формулам (13) и (14) данных по определению степени неравномерности рабочего процесса дизеля при работе на газотурбинном топливе с подогревом и оптимальной регулировкой топливной аппаратуры [2].

Таблица 3 – Результаты экспериментальных и расчетных данных [9, 10]

Номер ординаты	Параметры				
	P_z , МН/м ²	P_n , МН/м ²	m	P_{cp} , МН/м ²	δ
1	5,17	3,9	16	1,36	0,0147
2	5,27				
3	5,31				
4	5,24				
5	5,11				
6	5,18				
7	5,38				
8	5,17				
9	5,35				
10	5,21				
11	5,31				
12	5,27				
13	5,15				
14	5,27				
15	5,88				
16	5,41				

Значения δ для стандартного дизельного топлива незначительно отличались от приводимых в таблице 3.

Таким образом, проведение дополнительной регулировки топливной аппаратуры и оптимальный подогрев газотурбинного топлива позволяют существенно приблизить параметры рабочего процесса, включая значение δ , к таковым на стандартном дизельном топливе. Полученные значения δ не превышали допустимых в эксплуатации.

На рисунке 2 показано изменение давления в ЛНД дизелей 6Ч27, 5/36 при использовании газотурбинного (сплошная линия) и стандартного дизельного (пунктирная) топлива [2, 4].

Индикаторные диаграммы ряда последовательных циклов ($m = 16$) фотографировались зеркальным фотоаппаратом на пленку с экрана низкочастотного осциллографа С1-19 с последующей обработкой. Методика и аппаратное обеспечение экспериментов описаны ранее [9].

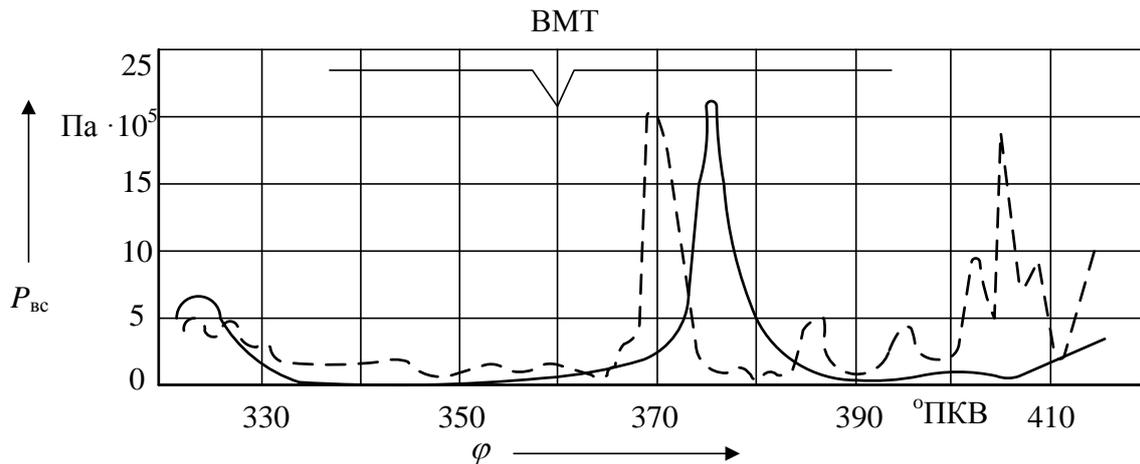


Рисунок 2 – Изменение давления в ЛНД дизеля 6Ч27,5/36:
 – стандартное дизельное топливо; --- – топливо газотурбинное [10];
 $P_{вс}$ – давление на входе в ТНВД

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Проведение дополнительной регулировки топливной аппаратуры, оптимальный подогрев газотурбинного топлива (если вязкость его больше, чем для дизельного топлива) существенно приближают параметры рабочего процесса, включая значение δ , позволяющее непрерывно диагностировать рабочий процесс в цилиндре, к параметрам на стандартном дизельном топливе [10].

2. Практика диагностики рабочего процесса показала [2, 4, 10] хорошую информативность параметра δ , что требует разработки приборов для непосредственного цифрового измерения предлагаемого параметра в совокупности со значениями P_z и T_z .

3. Предлагаемые решения позволяют более достоверно проводить сложный гидродинамический анализ процессов во всасывающих и отсечных полостях ТНВД судовых среднеоборотных и тепловозных дизелей, работающих на топливе с различными свойствами.

Список литературы

1. Файнлейб, Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. Справочник [Текст] / Б. Н. Файнлейб. – Л.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
2. Ведрученко, В. Р. Топливоиспользование в тепловозных дизелях. Системные методы исследований: Учебное пособие [Текст] / В. Р. Ведрученко / Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Омск, 1990. – 89 с.
3. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта [Текст] / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов // Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2008. – 144 с.

4. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте [Текст] / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
5. Работа дизелей на нетрадиционных топливах [Текст] / В. А. Марков, А. И. Гайворонский и др. – М.: Легион-Автодата, 2008. – 464 с.
6. О выборе схем и разработке технических решений систем топливоподачи альтернативных и тяжелых топлив в дизелях [Текст] / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – № 2. – Ч. 1. – С. 157 – 162.
7. Деревянин, С. Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей [Текст] / С. Н. Деревянин, В. А. Марков, В. Г. Семенов. – Харьков: Новое слово, 2007. – 45 с.
8. Ведрученко, В. Р. Требования к первичным преобразователям и аппаратуре для исследования рабочего процесса дизелей [Текст] / В. Р. Ведрученко // Тез. докл. III всесоюз. науч.-техн. конф. «Автоматизированные системы испытаний объектов железнодорожного транспорта» / Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Омск, 1991. – С. 83, 84.
9. Ведрученко, В. Р. Методика индентификации среднеоборотного судового дизеля [Текст] / В. Р. Ведрученко // Передовой опыт и новая техника / ЦБНТИ МРФ. – М., 1981. – Вып. 4. – С. 37 – 41.
10. Ведрученко, В. Р. Исследование влияния сорта топлива на характеристики среднеоборотного дизеля [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук / В. Р. Ведрученко. – Николаев, 1978. – 21 с.

УДК 621.331:621.311

А. С. Вильгельм, В. И. Гутников, М. М. Никифоров

АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В статье описаны общие принципы создания расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения, а также способы апробации полученной модели с целью установления степени ее адекватности.

Рекуперативное торможение на электроподвижном составе железных дорог предназначено в первую очередь для обеспечения безопасности движения поездов и является эффективным способом сокращения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

К основным факторам, определяющим эффективность применения рекуперативного торможения, относятся следующие:

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

– экономия тормозных колодок, снижение затрат на их замену;

– экономия на обточке колесных пар вагонов.

На эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации влияет большое количество факторов:

– профиль пути;

– вес и количество поезда (размеры движения);

– характеристика состава поезда;

– уровень напряжения в контактной сети;

– наличие потребителей возвращенной энергии;

- квалификация машиниста;
- качество настройки систем рекуперативного торможения;
- неравномерность тоннокилометровой работы в четном и нечетном направлениях;
- количество погрузочно-разгрузочных станций и разветвленность сети магистральных путей.

Многочисленность факторов, влияющих на эффективность применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации, обуславливает необходимость решения целого комплекса научно-исследовательских задач для определения потенциала рекуперативного торможения на каждом действующем участке и способов достижения расчетного уровня потенциала, а именно перечня организационно-технических мероприятий для повышения энергоэффективности рекуперативного торможения.

Экспериментальные исследования [1] показывают высокую эффективность рекуперативного торможения на участках постоянного тока с холмистым профилем пути, но по их результатам невозможно дать основательные ответы на вопросы потокораспределения энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения на двухпутных участках постоянного тока. Ввиду этого оптимальным средством для решения задач оценки потенциала рекуперативного торможения на поездоучастках и определения перечня организационно-технических мероприятий для достижения расчетного уровня потенциала является расчетная модель работы системы тягового электроснабжения.

Такая расчетная модель должна включать в себя комплекс расчетов, учитывающих большую часть факторов, влияющих на объем реализуемой энергии рекуперации, а также анализ экспериментальных исследований, опытных поездок на участках и статистической отчетности депо, работающих на данном участке.

В ходе выполнения работ по оценке энергоэффективности тяги поездов по сети железных дорог специалистами ОмГУПСа была создана расчетная модель на базе имитационного моделирования работы системы тягового электроснабжения в программном комплексе «КОРТЭС». Общие принципы проведения расчета потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения приведены в статье [2].

Полученная расчетная модель позволяет вносить корректировки в расчеты с целью актуализации параметров плана и профиля пути, параметров системы тягового электроснабжения, графика движения поездов, ограничений скорости, технической (участковой) скорости и др. Это позволяет выполнять многовариантные расчеты с целью определения оптимального варианта с точки зрения реализации энергии рекуперации. Кроме того, в данной расчетной модели предусмотрена возможность повышения степени адекватности производимых расчетов на основании анализа статистической отчетности депо, контрольных поездок по участкам и других практических мероприятий.

Общая блок-схема расчетной модели системы тягового электроснабжения представлена на рисунке 1.

На начальном этапе расчета выполняются анализ исходных данных и актуализация исходных файлов КОРТЭС с параметрами пути, действующим на участке электроподвижным составом, размерами движения поездов на участке, параметрами системы тягового электроснабжения.

Как видно из рисунка 1, все работы по оценке потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения можно разделить на несколько этапов:

- 1) проведение тяговых расчетов;
- 2) составление графика движения поездов;
- 3) проведение электрических расчетов и получение результатов оценки потенциала, таких как абсолютные значения расхода и рекуперации, удельные расход и рекуперация по участку, уровень потерь электроэнергии в тяговой сети, выполненная тоннокилометровая работа.

Итоговые электрические расчеты являются многовариантными и выполняются на основе графиков движения поездов. В результате для каждого варианта определяются энергия, потребленная на тягу поездов по каждой из подстанций и в целом по расчетному участку;

энергия, возвращенная в сеть выпрямительно-инверторными преобразователями, по каждой из подстанций и в целом по расчетному участку;

нереализованная энергия рекуперации из-за превышения в тяговой сети допустимых значений напряжения и вынужденного перехода на реостатное или пневматическое торможение, а также из-за отсутствия приемников электрической энергии (поездов в режиме тяги и приемников избыточной энергии рекуперации на тяговых подстанциях) на участках с большими размерами движения;

потери электроэнергии в тяговой сети по результатам расчета в целом по участку.



Рисунок 1 – Блок-схема расчетной модели системы тягового электроснабжения (СТЭ) для определения потенциала рекуперативного торможения

Расчеты производятся для следующих вариантов применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации:

вариант 1 – применение рекуперативного торможения в размерах, определяемых потреблением энергии рекуперации электровозами в тяговом режиме только с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИПами), фактически установленными на тяговых подстанциях (ТП) участка;

вариант 2 и последующие – применение рекуперативного торможения в размерах, необходимых для обеспечения заданной скорости движения, с преобразованием избыточной энергии рекуперации выпрямительно-инверторными преобразователями или другими приемниками электроэнергии на тяговых подстанциях для различных вариантов мест их установки на участке.

Таким образом, определяется оптимальный вариант установки выпрямительно-инверторных преобразователей с точки зрения реализации энергии рекуперации. Проводится технико-экономический расчет целесообразности установки выпрямительно-инверторных преобразователей на участке.

Данные об объемах расхода и рекуперации энергии из первого варианта расчетов используются для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения:

$$\Delta P = \left(\frac{W_{\text{Р}}^{\text{ЭПС}}}{W_{\text{П}}^{\text{ЭПС}}} - \frac{W_{\text{Рф}}^{\text{ЭПС}}}{W_{\text{Пф}}^{\text{ЭПС}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $W_{\text{Р}}^{\text{ЭПС}}$, $W_{\text{П}}^{\text{ЭПС}}$, – значение рекуперированной и потребленной поездами электроэнергии соответственно по результатам расчета по первому варианту, кВт·ч;

$W_{\text{Рф}}^{\text{ЭПС}}$, $W_{\text{Пф}}^{\text{ЭПС}}$, – фактический объем рекуперированной и потребленной на тягу поездов электроэнергии по отчетным данным, кВт·ч.

Наличие потенциала обуславливается главным образом неисправностями в схемах рекуперативного торможения на электроподвижном составе и нестабильной работой системы тягового электроснабжения, в сравнении с которой схема, смоделированная в КОРТЭС, может считаться идеальной. Названные причины, в свою очередь, указывают на способы достижения расчетного потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения – главным образом это ремонт и наладка схем рекуперативного торможения на электроподвижном составе и стабилизация работы системы тягового электроснабжения.

Апробация расчетной модели, корректировка расчетов, установление адекватности расчетной модели.

Как правило, проверка адекватности разработанных расчетных моделей проводится сопоставлением данных экспериментальных исследований специальной физической модели с результатами исследований на расчетной модели.

Отличительной особенностью приведенной расчетной схемы является то, что проверка адекватности уже содержится в ее алгоритме. Адекватность устанавливается при расчете для каждого конкретного участка и повышается путем внесения корректировок в производимые расчеты, а также устанавливается проверкой статистической совместимости полученных конечных расчетных результатов с фактическими показателями работы реального действующего участка. Иначе говоря, корректировки в расчеты по каждому рассчитываемому участку вносятся до тех пор, пока итоговые результаты расчета не будут удовлетворять сравнительному анализу с фактическими отчетными данными.

Как видно из блок-схемы расчетной модели, основой всего комплекса расчетов является тяговый расчет. Повышение адекватности тягового расчета осуществляется путем приближения условий его проведения к реальным условиям на участке за счет корректировки значений уровней напряжения и тока на токоприемниках электроподвижного состава по результатам анализа данных систем регистрации параметров движения и автоведения (РПДА) и контрольных поездок.

Для детального анализа расхода электроэнергии и объема энергии рекуперации с целью внесения корректировок в расчеты необходим анализ данных РПДА по результатам как контрольных, так и рабочих поездок локомотивных бригад на исследуемых участках.

Общий отчет по картриджу РПДА позволяет получить сведения о пройденном поездом пути, затраченном на поездку времени, технической и участковой скорости, выполненной тоннокилометровой работе, общей потребленной и рекуперированной за поездку энергии и некоторых других данных по результатам отдельных поездок. Детальный отчет о расходе энергии дает информацию в табличной форме о напряжении и токе на токоприемнике электроподвижного состава в процессе движения. Из расшифровки нескольких картриджей РПДА составляется итоговая таблица для усреднения значений тока и напряжений в контактной сети на токоприемниках ЭПС в функции пути. Средние значения тока и напряжений используются для корректировки напряжения на токоприемниках электропоездов в режимных картах тяговых расчетов.

На рисунке 2 приведен фрагмент окна тяговых расчетов в КОРТЭС. Цифрами 1 – 6 обозначены участки возможного применения рекуперативного торможения согласно тяговому расчету. По результатам анализа расшифровки картриджей РПДА на участках под номерами 1, 2, 4, 5 пневматическое торможение практически всегда сопровождается рекуперативным, в то время как на участке № 3 рекуперативное торможение используется незначительно, а на

участке № 6 не применяется в большинстве случаев. Возможно, это связано с отсутствием приемников энергии рекуперации – поездов, идущих в данные моменты в режиме тяги в текущей и смежных межподстанционных зонах, и инверторов или поглощающих установок на тяговых подстанциях. Ответ на данный вопрос можно получить по результатам электрического расчета, выполненного на основе действующего графика движения поездов и действующей на участке схемы тягового электроснабжения.

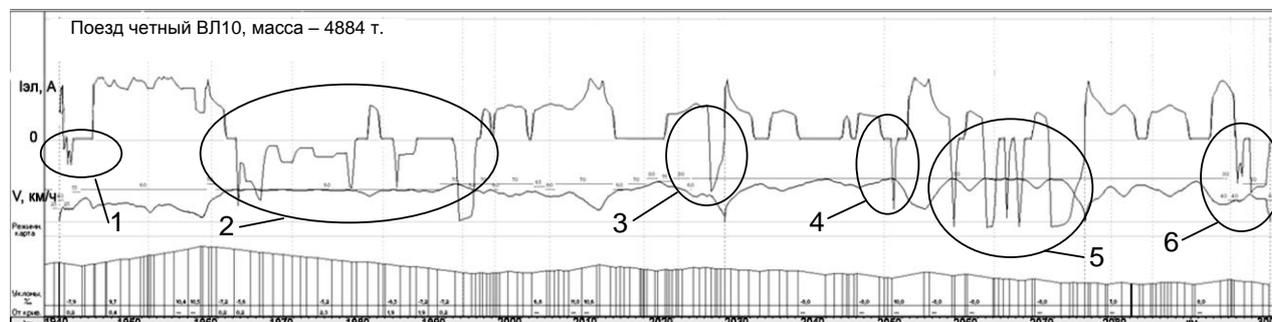


Рисунок 2 – Графики тока двигателей и электровоза, скорости движения поезда в КОРТЭС

В первую очередь анализ данных РПДА представляет собой обработку значений напряжения и тока на токоприемниках ЭПС в процессе движения по перегонам в режимах тяги и рекуперации. Данный анализ предваряет расчеты в КОРТЭС – в программе, осуществляющей тяговые расчеты, выделяются интервалы тяги и рекуперации, на которых и задаются средние значения напряжения и тока, полученные по результатам анализа.

Таким образом, с учетом исходных данных (см. рисунок 1), используемых для выполнения тягового расчета, а также корректировки напряжения и тока на токоприемниках по результатам анализа данных РПДА создаются все необходимые предпосылки для адекватности тягового расчета, в котором определяются объемы расхода и возврата электроэнергии в контактную сеть электроподвижным составом и все необходимые для дальнейших расчетов параметры.

Контрольные поездки предназначены для определения общих удельных показателей по участку в целом для поездов конкретной массы, составности, нагрузки на ось и контроля за показаниями измерительных приборов локомотива главным образом на участках, где обращается электроподвижной состав, не оснащенный системами РПДА. На таких участках без проведения контрольных поездок не представляется возможным провести анализ тока и напряжения в контактной сети, а также определить участки применения рекуперативного торможения.

После проведения тяговых расчетов необходимо выполнение сравнительного анализа полученных значений расхода и возврата электроэнергии на тягу поездов с отчетными данными депо, локомотивные бригады которых работают на данном расчетном участке.

В первую очередь необходимо определить характер распределения значений удельного расхода и удельной рекуперации для конкретных серий электроподвижного состава и нагрузок на ось состава по отчетным данным депо. В связи с тем, что практически во всех локомотивных депо для всех плеч работы локомотивных бригад существуют удельные нормы расхода электроэнергии и рекуперации, которые бригады стараются выполнять, выборка данных значений чаще всего будет иметь нормальный характер распределения с математическим ожиданием в области значения норм удельного расхода и удельной рекуперации на данном участке. Тем не менее необходимо выполнить проверку гипотезы о нормальном распределении с помощью критерия Пирсона. Если нет оснований отвергать гипотезу о нормальности закона распределения, то определяется доверительный интервал выборки по «правилу 3σ », где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) выборки:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(w_{Pi} - w_{Pcp})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где n – количество значений удельной величины по результатам поездок в выборке;
 w_{Pi} – i -е значение удельной величины в выборке;
 w_{Pcp} – среднее арифметическое значение удельной величины в выборке.

Удельные значения расхода и рекуперации электроэнергии по результатам моделирования, не попадающие в доверительный интервал, можно считать промахами. В случае выборки, не подчиняющихся нормальному закону распределения, для получения доверительного интервала по указанным выше принципам необходимо, чтобы объем выборки составлял $n \geq 30$, а для достоверной оценки СКО объем выборки n должен превышать 100.

Результаты апробации расчетной модели системы тягового электроснабжения по сети дорог постоянного тока.

В качестве примера апробации расчетной схемы (проверки адекватности получаемых расчетных значений удельной рекуперации электроэнергии) на рисунке 3 представлено распределение величин удельной рекуперации локомотивов ВЛ10 с нагрузкой на ось состава 18 т на действующем участке постоянного тока в одном направлении. Локомотивные бригады депо, работающие на данном направлении, по большей части выполняют нормы удельной рекуперации (6,5 кВт·ч/10⁴ткм брутто), поэтому 71,0 % поездок имеют показатель удельной рекуперации 5,0 – 8,0 кВт·ч/10⁴ткм брутто.

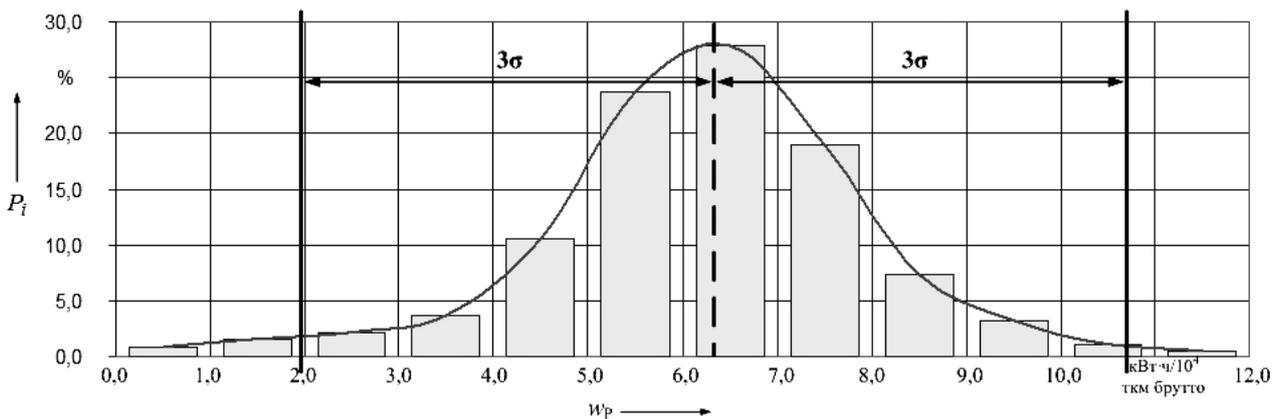


Рисунок 3 – Нормальное распределение величин удельной рекуперации на конкретном участке по отчетности депо

Математическое ожидание выборки в данном примере, кВт·ч/10⁴ткм брутто,

$$w_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}; \quad (3)$$

$$w_{cp} = 6,3.$$

СКО выборки σ составляет при этом 1,47 кВт·ч/10⁴ткм брутто. Таким образом, расчетные значения удельной рекуперации, не попадающие в интервал значений 1,9 – 10,7 кВт·ч/10⁴ткм брутто, можно считать промахами.

По результатам расчетов, выполненных по описанному выше алгоритму применительно к данному участку, локомотивам серии ВЛ10 с поездами различной массы с нагрузкой на ось 18 т, с корректировкой уровней напряжения и тока на токоприемниках значения удельной рекуперации составили 8,0 – 9,0 кВт·ч/10⁴ткм брутто, что свидетельствует о наличии потенциала рекуперативного торможения по отношению к норме удельной рекуперации, действующей в депо для данного направления, локомотивов ВЛ10 с поездами нагрузкой на ось 18 т.

Необходимо отметить, что, как правило, расчетные результаты удовлетворяют «сравнительному анализу», который, вместе с тем, необходим для выявления явных промахов и исправления расчетов или исключения расчетных файлов с такими промахами из дальнейшего моделирования.

Полученные по результатам тяговых расчетов итоговые значения энергии рекуперации можно считать абсолютной энергией рекуперации, так как в тяговом расчете не учитываются параметры системы тягового электроснабжения и график движения поездов и, следовательно, не учитывается наличие приемников энергии рекуперации. Таким образом, полученная в результате тягового расчета величина энергии рекуперации – это максимально возможная величина возврата по физико-механическим свойствам каждой единицы электроподвижного состава. Дальнейшие расчеты направлены на определение объемов энергии рекуперации, которые можно реализовать в текущих условиях работы участка, а также в условиях внедрения технических средств и мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности применения рекуперативного торможения.

Результаты тяговых расчетов используются в дальнейшем для построения энергетических диаграмм [3]. Расчетные файлы, созданные при проведении тяговых расчетов, служат основой для составления графика движения поездов.

Таким образом, основным преимуществом блок-схемы расчетной модели работы системы тягового электроснабжения, представленной на рисунке 1, является то, что она уже содержит в себе алгоритм апробации. На основе применения данной схемы к действующим участкам постоянного тока железных дорог РФ специалистами ОмГУПСа была выполнена оценка потенциала рекуперативного торможения на поездоучастках постоянного тока, в ходе которой была проведена апробация и установлена адекватность расчетной модели.

Тяговые расчеты были выполнены на основании Приказа по унифицированным и критическим весовым нормам грузовых поездов, Плана технической и участковой скоростей движения поездов на участках, информации о плане и профиле пути, Приказа по ограничению скоростей, режимных карт вождения поездов и ряда других нормативных документов. Корректировка тяговых расчетов выполнялась на основании детального анализа расшифровки картриджей РПДА, а все результаты расчетов проходили проверку статистических гипотез, и только в случае адекватности сам расчет принимался за основу при построении энергетических диаграмм, а также при составлении графика движения поездов и проведении электрических расчетов.

Многовариантные электрические расчеты позволили оценить потенциал рекуперативного торможения для всех участков постоянного тока российских железных дорог, а также составить перечень мероприятий, экономически целесообразных для внедрения с целью достижения расчетного уровня потенциала.

Разработанная расчетная модель системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока была использована для оценки технико-экономической эффективности внедрения на тяговых подстанциях сети железных дорог постоянного тока выпрямительно-инверторных преобразователей [4] и накопителей электрической энергии [5], а также для оценки эффективности применения рекуперативного торможения на двухпутных участках железных дорог при отсутствии выпрямительно-инверторных преобразователей [6].

Список литературы

1. Вильгельм, А. С. Экспериментальные исследования по оценке потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1 (5). – С. 50 – 56.
2. Никифоров, М. М. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, В. А. Кандаев //

Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 1 (9). – С. 72 – 78.

3. Вильгельм, А. С. Принципы построения энергетических диаграмм для оценки эффективности применения рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2 (10). – С. 63 – 68.

4. Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 2 (14). – С. 75 – 84.

5. Черемисин, В. Т. Выбор мест установки накопителей электрической энергии на полигоне постоянного тока железнодорожного транспорта по критерию энергоэффективности [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – СПб. – 2013. – № 2 (6). – С. 48 – 52.

6. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижного состава [Текст] / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм и др. // Локомотив. – 2013. – № 8. – С. 5 – 8.

УДК 621.336.2

А. В. Паранин, А. В. Ефимов, Д. А. Ефимов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСТОГО КОНТАКТА МЕЖДУ КОНТАКТНЫМ ПРОВОДОМ И ТОКОСЪЕМНОЙ ПЛАСТИНОЙ В СТАТИКЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье предложена конечно-элементная модель работы электрического контакта между контактными проводом и токосъемной пластиной токоприемника, учитывающая сложную взаимосвязь электрических и тепловых процессов. Исследовались контактные пары, состоящие из изношенного контактного провода МФ-100 и токосъемных пластин из металлокерамики ВЖЗП или графита. Микрогеометрия поверхности тел в месте контакта получена на основе модели Гринвуда – Вильямсона. Было рассмотрено два крайних возможных случая соприкосновения контактного провода с пластиной. Результаты были проанализированы и сравнены с известными опытными данными. Рассчитано, при каких соотношениях контактного нажатия и тока из-за выгорания контактов возникнет искровой или дуговой разряд. Определены пути совершенствования модели.

Электрический контакт «контактный провод – токосъемная пластина токоприемника» является важным элементом, обеспечивающим связь системы электроснабжения с электрифицированным транспортом, поэтому необходимо уметь определять параметры работы контакта по заданным исходным данным. В настоящее время для описания и расчета электрических контактов широко используется теория, созданная еще в 50 гг. XX в. Р. Хольмом [1]. Однако разработанная модель имеет ряд допущений: обязательное подобие температурного и электрического полей, отсутствие микрошероховатостей в месте соприкосновения, представление электрических контактов двумя бесконечными полупространствами, линейность зависимости электрических и теплофизических свойств материалов от температуры. Сейчас имеются инструменты, которые позволяют отказаться от перечисленных допущений. Сразу разработать такую модель электрического контакта, которая учитывала бы всю его структурную сложность и условия работы (включая динамику) практически нереально. Авторы настоящей статьи решили вначале рассмотреть данный контакт без движения пластины по контактному проводу и при чистых металлических поверхностях без пленок. Далее по мере необходимости и целесообразности эту модель можно постепенно совершенствовать. Следует отметить, что авторы статьи уже имеют положительный опыт применения метода конечных элементов для

расчета нагрева токоприемника и полоза при токосъеме с учетом токораспределения между токосъемными пластинами [8, 9]. В этих моделях электрический контакт был условно заменен сначала просто потоком тепла, а позднее – «фиктивным телом», которое распределяло тепловую мощность, выделяющуюся в месте контакта от протекания тока, между ползком и контактным проводом автоматически в зависимости от поля температуры. Значение контактного сопротивления рассчитывалось аппроксимацией опытных данных.

Наиболее часто используемый подход для описания механического контакта шероховатых поверхностей основан на модели Гринвуда – Вильямсона [2, с. 61]. В этой модели шероховатая поверхность принимается состоящей из сферических неровностей постоянного радиуса, равного среднему радиусу кривизны исходных поверхностей. В предположении нормального распределения высот неровностей в соответствии с известной плотностью материала для нормальной нагрузки были получены выражения для расчета количества контактных площадок, средней площади контакта, фактической площади контакта и зазора между поверхностями. Впервые модель Гринвуда – Вильямсона (с последующими ее усовершенствованиями) для описания контакта токосъемной пластины и контактного провода была использована в работе [3, с. 50]. Авторы данной работы показали последовательность расчета количества контактных пятен и реальной площади контакта на основе указанной модели шероховатости. Кроме этого указываются численные значения параметров, необходимых для расчета, в случае медного контактного провода и графитовой токосъемной пластины. Расчет ведется для случая, когда шероховатая деформируемая поверхность находится в нормальном контакте с абсолютно твердой идеально плоской поверхностью. Для понимания дальнейших рассуждений приведем необходимые формулы из работы [3, с. 50].

Функция плотности распределения высоты d шероховатости относительно средней поверхности тела подчиняется экспоненциальному закону:

$$q(d) = ce^{-\lambda d}, \quad (1)$$

где c и λ – параметры распределения.

Количество выступов (контактных точек) на высоте d относительно средней поверхности тела определяется выражением:

$$\eta_K = \eta A_n \frac{c}{\lambda} e^{-\lambda d}, \quad (2)$$

где η – поверхностная плотность выступов;

A_n – номинальная площадь контакта.

Реальная площадь контакта будет определяться по выражению:

$$A_r = \pi \eta r \psi A_n (e^{-\lambda d} + e^{-\lambda(d+\delta_{cr})}), \quad (3)$$

где ψ – стандартное отклонение высоты шероховатости σ ;

r – радиус верхней сферической части шероховатости;

δ_{cr} – параметр, определяемый началом пластической деформации.

$$\delta_{cr} = r \left(\frac{\pi K H}{2E'} \right)^2, \quad (4)$$

где K – коэффициент пластической деформации;

H – твердость материала;

E' – эквивалентный коэффициент упругости.

Усилие в контакте определяется выражением:

$$F = K H A_r. \quad (5)$$

Численные значения необходимых для расчета параметров для меди и графита взяты из работы [3, с. 58]. Коэффициент пластических деформаций K принят для всех материалов равным 0,6. Для металлокерамики ВЖЗП значения большинства параметров в литературе

отсутствуют. Учитывая, что на 75 % металлокерамика состоит из железа, соответствующие значения были приняты как для железа. Номинальная площадь контакта A_n равняется произведению ширины рабочей поверхности токосъемной пластины на ширину рабочей поверхности контактного провода. Контактный провод МФ-100 был взят с равномерным износом рабочей поверхности шириной 7,2 мм. Ширина рабочей поверхности токосъемных пластин при износе не меняется и равна 30 мм для графитовой пластины и 18 мм – для пластины ВЖЗП.

Рассмотрим шероховатую поверхность контактного провода и токосъемной пластины (рисунок 1). Расстояние между средними линиями профиля контактного провода и пластины равно D , высота шероховатости пластины относительно средней линии профиля – d_1 , для контактного провода – d_2 .

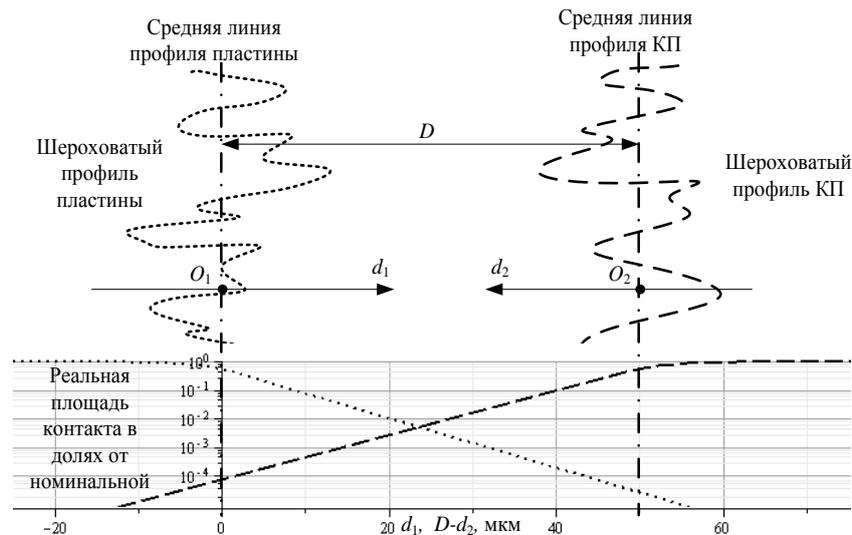


Рисунок 1 – К вопросу о расчете реальной площади контакта двух шероховатых поверхностей для случая с пластинами ВЖЗП

На рисунке 1 показаны зависимости долей реальных площадей контакта от номинальной A_r / A_n от расстояния d_1 для токосъемной пластины и для контактного провода. Произведение указанных долей равно доле средней площади перекрытия шероховатостей двух тел от номинальной площади контакта при данном расстоянии d_1 . Общая площадь контакта двух шероховатых поверхностей будет определяться путем численного интегрирования данной величины. После этого рассчитывается усилие в контакте при $A_r = A_{rk}$ и твердости H наиболее мягкого материала из контактной пары. Результат расчета реальной площади контакта A_r и контактного нажатия F в зависимости от расстояния D по изложенной методике для контактного провода МФ-100 с равномерным износом рабочей поверхности шириной 7,2 мм и неизношенной токосъемной пластины ВЖЗП показан на рисунке 2.

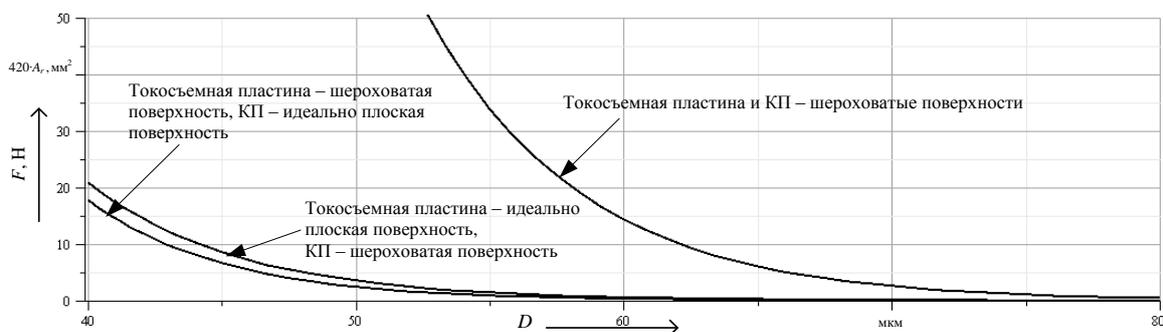


Рисунок 2 – Графики зависимости контактного нажатия F и реальной площади контакта A_r (в масштабе 420:1) от расстояния D между средними линиями профиля рассматриваемых токосъемной пластины ВЖЗП и контактного провода МФ-100 с поверхностью износа шириной 7,2 мм

Из рисунка 2 видно, что при шероховатых поверхностях реальная площадь контакта и сила контактного нажатия при уменьшении расстояния между ними возрастают значительно быстрее, чем когда одна из поверхностей идеально гладкая. При графитовых токосъемных пластинах ситуация в целом аналогичная, только графит – более шероховатый и более мягкий материал по сравнению с медью – и область пересечения графиков A_r / A_n будет сдвинута ближе к меди. Вся площадь касания A_r будет распределена на всем расстоянии D и даже частично будет находиться за средней линией профиля поверхностей. Возникает вопрос, как учесть подобную ситуацию на конечно-элементной модели, которая требует конкретной геометрии. В этом случае авторы статьи предлагают ввести следующие упрощения:

реальные рабочие шероховатые поверхности контактного провода и пластины заменяются идеально гладкими плоскими поверхностями, расположенными на расстоянии D друг от друга, за исключением тех областей, где осуществляется контакт;

область контакта представляет собой два соприкасающихся усеченных круговых конуса, основания которых расположены на гладких поверхностях контактного провода и токосъемной пластины. Окружность соприкосновения конусов расположена в точке пересечения графиков A_{r1} / A_n и A_{r2} / A_n , для которой $d_1 = 0,5D$ для пластины ВЖЗП и $d_1 = 0,7D$ для графитовой пластины;

множество таких одинаковых областей контакта распределено равномерно по всей номинальной поверхности соприкосновения контактного провода и токосъемной пластины. В дальнейшем будем применять к таким областям термин «контактные пятна» или «а-пятна».

С уменьшением расстояния D увеличивается количество областей соприкосновения (а-пятен) и уменьшается высота усеченных конусов, угол раствора конуса и окружность соприкосновения остаются постоянными. Площадь окружности соприкосновения находится из отношения A_r и количества а-пятен для наиболее мягкого материала в контактной паре. С принятыми допущениями, задаваясь расстоянием D между средними линиями профилей контактного провода и токосъемной пластины, можно рассчитать соответствующее контактное усилие и создать конкретную трехмерную геометрию, которая необходима при решении задачи с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Построение конечно-элементной модели производилось в программном комплексе Comsol Multiphysics [4]. Подобная задача требует расчета взаимосвязанных электрических и тепловых процессов, так как при протекании тока происходит нагрев, что ведет к повышению сопротивления, а это в свою очередь влияет на протекание электрического тока и т. д. Рассмотрим вначале электрическую часть задачи. Протекание электрического тока во всех телах рассматриваемой модели описывается законом непрерывности электрического тока в проводнике:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad (6)$$

где \mathbf{j} – вектор плотности электрического тока.

На одном из торцов контактного провода задана величина нормального (по нормали к поверхности) вектора плотности тока \mathbf{j}_n . На одном из торцов токосъемной пластины задано граничное условие $V = 0$. На всех остальных наружных поверхностях задано граничное условие $\mathbf{j}_n = 0$, которое означает, что электрический ток не может протекать через эту поверхность. На внутренних поверхностях задано граничное условие непрерывности вектора \mathbf{j}_n . Если все а-пятна являются металлическими без пленок, то на гранях окружностей соприкосновения усеченных конусов будет также условие непрерывности вектора \mathbf{j}_n . Начальное условие для всех тел. $V_{t=0} = 0$. Для описания тепловых процессов в твердом теле при отсутствии движения среды в Comsol Multiphysics используется уравнение теплового баланса:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad}(T)) = Q, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала;

C_p – теплоемкость материала;

k – теплопроводность материала;

T – температура;

Q – тепловая мощность в единице объема.

На всех внешних поверхностях задано граничное условие охлаждения за счет конвекции и лучеиспускания:

$$q_n = -h_{cnv}(T - T_{окр}) - \varepsilon_p C_B (T^4 - T_{окр}^4), \quad (8)$$

где h_{cnv} – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности;

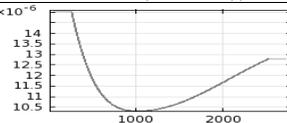
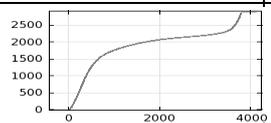
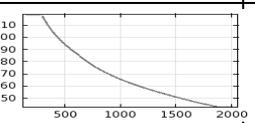
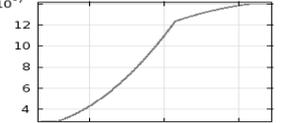
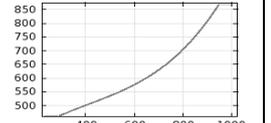
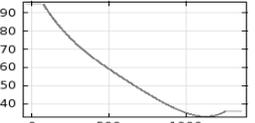
$T_{окр}$ – температура окружающей среды;

ε_p – степень черноты поверхности;

C_B – постоянная Стефана – Больцмана.

На всех внутренних границах задано условие непрерывности нормального вектора потока тепла q_n через данную поверхность. Начальное условие для теплового расчета во всех телах: $T_{t=0} = T_H$. Источником тепла Q является резистивная мощность в единице объема j^2/σ , определяемая из электрического расчета, а величина удельного сопротивления среды зависит от температуры $\sigma = \sigma(T)$. Два этих обстоятельства связывают тепловой и электрический расчет и делают систему уравнений смешанной. Численные значения свойств материалов, взятые при расчете МКЭ, приведены в таблице. Некоторые параметры материалов зависят от абсолютной температуры и представлены в таблице в виде формул или графиков от $f(T)$.

Численные значения свойств материалов при расчете МКЭ

Материал	Значение параметра в зависимости от абсолютной температуры T					
	$1/\sigma$, Ом·м	ρ , кг/м ³	C_p , Дж·кг/К	k , Вт·м/К	ε_p	h_{cnv} , Вт·м ² /К
Медь	$1.72 \cdot 10^{-8} (1 + 0.0039 \cdot (293 - T))$	8700	385	400	0.8	20
Графит		1750			0.8	20
ВЖЗП		7750			0.8	20

Для расчета используется сложная комбинированная сетка, состоящая как из тетраэдров, так и из треугольных прямых призм (рисунок 3). Общее количество элементов сетки в зависимости от числа а-пятен варьировалось от 50 до 300 тыс.

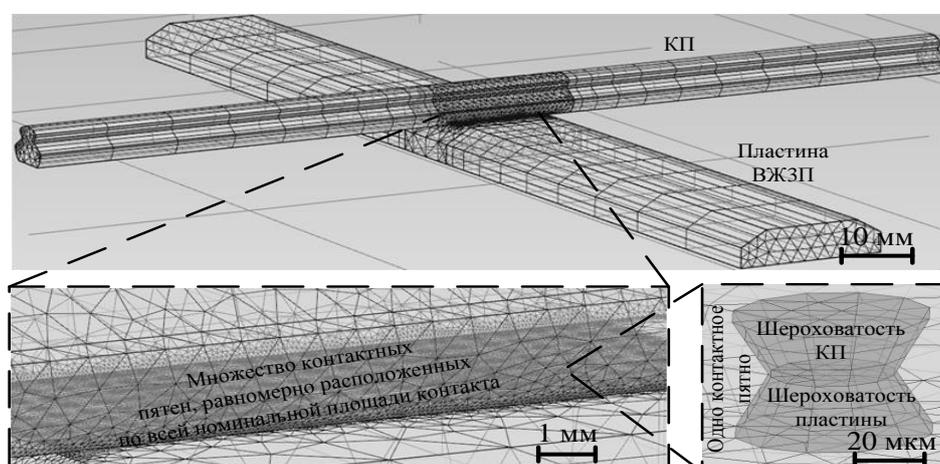


Рисунок 3 – Расчетная сетка (токосъемная пластина ВЖЗП)

Расчет ведется по времени исходя из начальных условий. Для расчета перемешанной системы дифференциальных уравнений (СДУ) на каждом шаге по времени использован метод последовательных итераций с разделением переменных. При использовании компьютера с процессором Intel Core i7 3000 Ггц и 12 Гбайт оперативной памяти время расчета в зависимости от числа а-пятен составляло от двух часов до суток, количество степеней свободы – от 200 тыс. до 1 млн 200 тыс.

Было подобрано пять вариантов параметров геометрии конечно-элементной модели с таким количеством а-пятен, чтобы значения контактного нажатия лежали в пределах, встречающихся в эксплуатации, примерно от 5 до 160 Н. Значения тока 100, 300, 750, 1500, 3000 А подобраны исходя из таких же соображений. Результатом расчета являются поля потенциала V и температуры T во всей расчетной области во все заданные моменты времени. Исходя из этих полей может быть рассчитан какой-либо другой интересующий параметр, к примеру, плотность тока j или кондуктивный поток тепла q (рисунок 4).

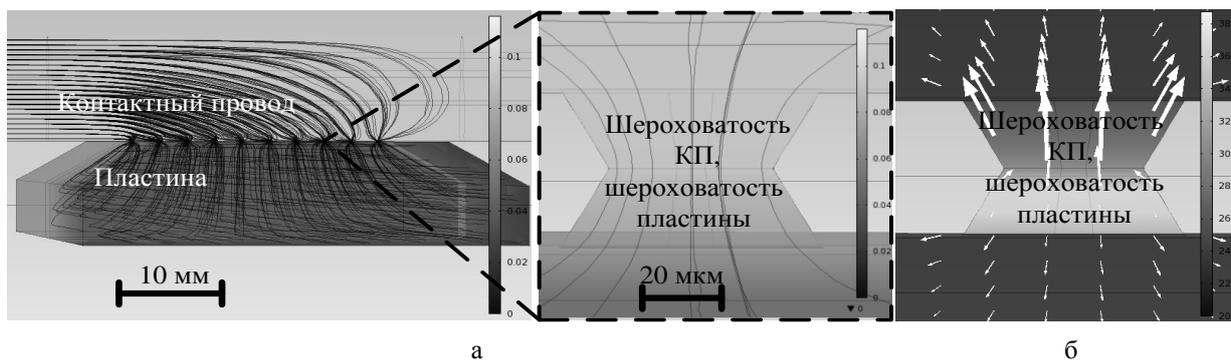


Рисунок 4 – Результат расчета в виде цветной эпюры поля электрического потенциала V , черных линий плотности тока j (а) и эпюры поля температуры T , кондуктивного потока тепла q в виде стрелок (б) (токосъемная пластина – ВЖЗП, 50 а-пятен, ток – 750 А, время – 0,001 с)

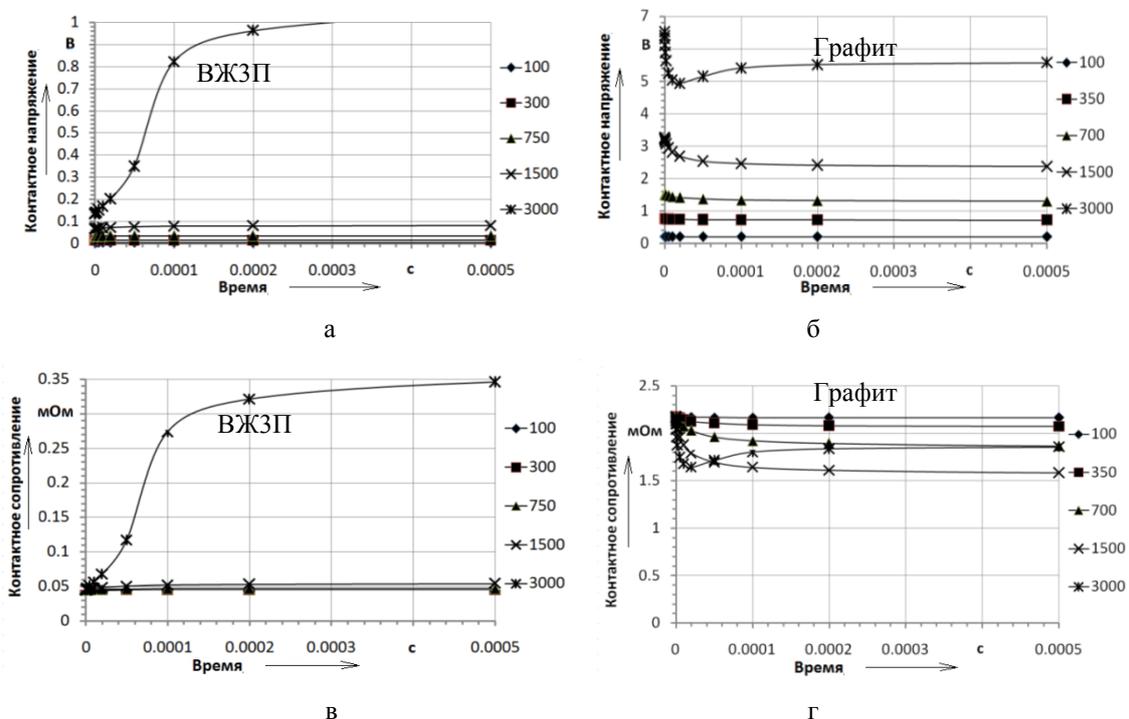


Рисунок 5 – Изменение во времени контактного напряжения и контактного сопротивления при 50 а-пятнах, различных значениях тока и различном материале токосъемных пластин

Результаты расчета каждого варианта при различных значениях тока и количестве а-пятен необходимо проанализировать. Контактное напряжение U_k , т. е. падение напряжения в контакте, определяется разностью потенциалов точек, ограничивающих область стягивания

[1, с. 23, 51]. На КП это может быть любая точка на торце контактного провода, противоположном тому, с которого подается электрический ток. На пластине это точка на торце, с которого не снимается ток, для условия, соответствующего рисунку 5: $U_k = 0.035$ В. Если контактное напряжение поделить на величину тока, то полученное значение будет контактным сопротивлением R_k . Вследствие нагрева материалов контактного провода и токосъемной пластины при протекании тока U_k и R_k будут меняться во времени (см. рисунок 5). Характер изменения R_k в зависимости от температуры будет определяться зависимостью удельного сопротивления материала $1/\sigma$ от температуры (см. таблицу).

Как показывает анализ, в случае пластин ВЖЗП в зависимости от количества а-пятен и значения тока примерно 50 – 60 % от общего контактного сопротивления приходится на микрошероховатости пластины, 30 – 47 % – на область стягивания в массиве материала пластины, 6,5 – 7,3 % – на микрошероховатости КП и 0,5 – 3,5 % – на область стягивания в массиве материала КП. Для токосъемных пластин из графита указанные доли контактного сопротивления составляют соответственно, %: 43 – 68; 32 – 60; 0,03 – 0,17 и 0,02 – 0,15. Преобладающая часть контактного сопротивления приходится на пластины, особенно если они графитовые. Поле температуры весьма неоднородно по объему расчетной области. Наиболее нагретая область находится в микрошероховатостях (в форме усеченных конусов) а-пятен токосъемной пластины (рисунок 6). Эта область, особенно при графитовых пластинах, смещена ближе к поверхности соприкосновения с микрошероховатостью контактного провода.

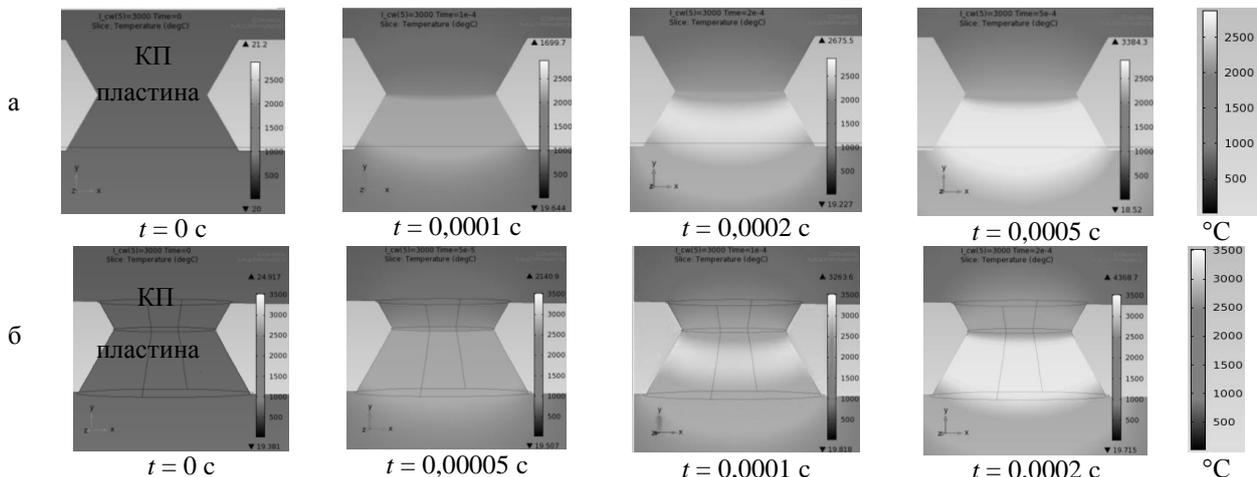


Рисунок 6 – Температура микрошероховатостей в градусах Цельсия в различные моменты времени при 50 а-пятнах, токе 3000 А и токосъемных пластинах из ВЖЗП (а) и графита (б)

Расчет имеет смысл производить до момента времени, при котором микрошероховатости а-пятен не достигнут определенной температуры, которая приведет к их деформации, расплавлению или испарению. Учитывая неравномерное распределение температуры в объеме контактных пятен, условно примем, что их расплавление произойдет, когда половина объема контактных микрошероховатостей токосъемной пластины или контактного провода достигнет температуры, превышающей температуру плавления материала. Аналогичное условие примем для фиксации момента испарения а-пятен, только используя температуру кипения материала. Температура плавления меди равна 1083 °С, железа (ВЖЗП) – 1538 °С, температура кипения меди составляет 2567 °С, железа – 2862 °С. Графит, в отличие от металлов, при атмосферном давлении не переходит в жидкую фазу, его прочность при нагревании до 2800 °С возрастает в 1,5 – 2,5 раза, потом резко падает, настолько, что при 3200 °С его прочность равна прочности при 20 °С. При 3507 °С графит сублимирует [4]. Можно считать, что при 3350 °С графит практически полностью теряет механическую прочность. Данную температуру для графита допустимо соотнести с температурой плавления металлов. Результаты подобных измерений и расчетов приведены на рисунке 7. Под контактной плотностью тока J_k будем понимать отношение величины тока I к реальной площади контакта A_r .

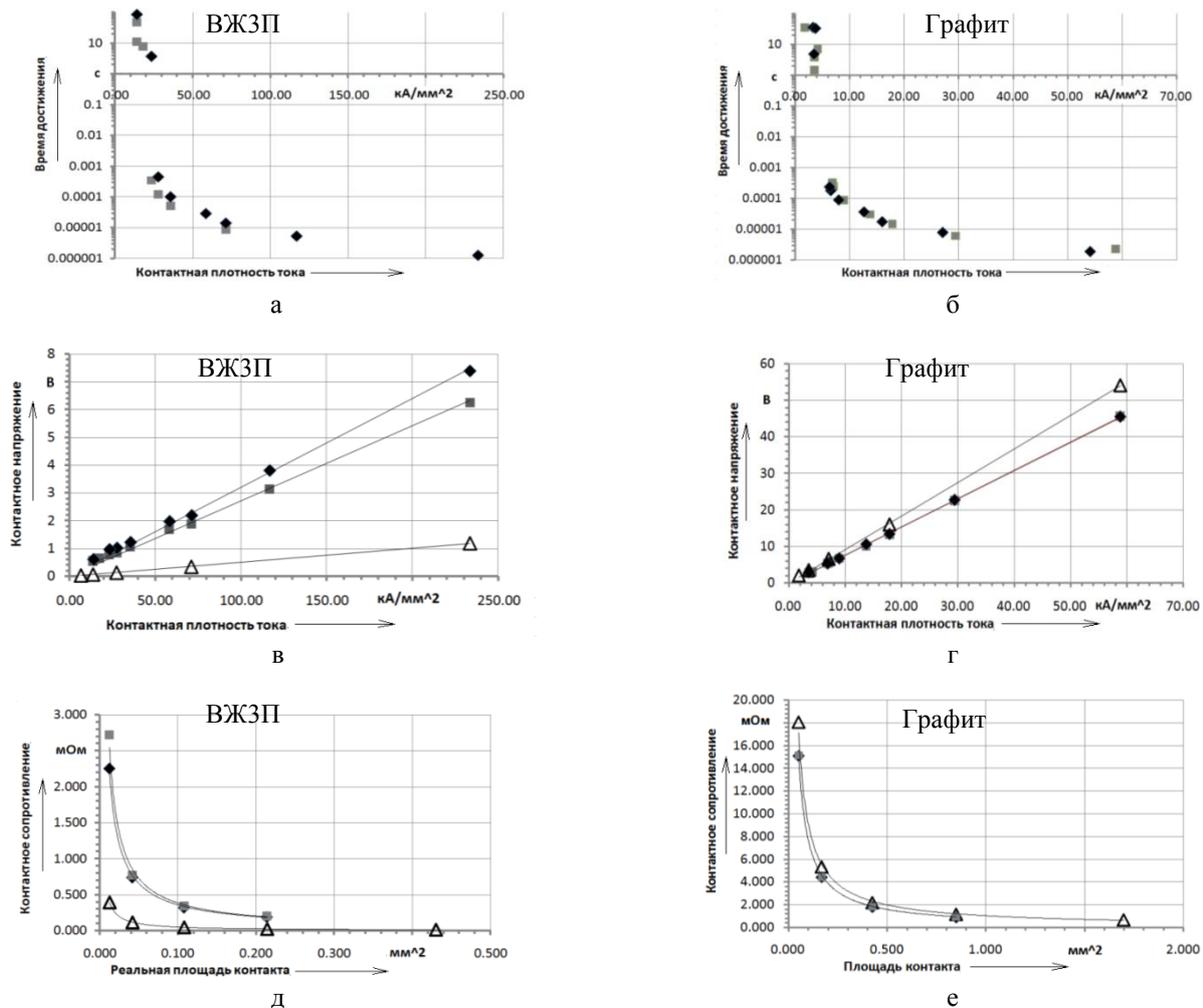


Рисунок 7 – Графики зависимости: времени достижения расплавления и испарения а-пятен от контактной плотности тока; контактного напряжения в начальный момент, в момент расплавления и в момент испарения а-пятен от контактной плотности тока; контактного сопротивления в начальный момент, в момент расплавления и в момент испарения а-пятен от реальной площади контакта при пластинах из ВЖЗП и графита:

△ – начальный момент времени; ■ – момент расплавления а-пятен; ◆ – момент испарения а-пятен

В рассмотренной выше модели предполагалось, что рабочие поверхности контактного провода (КП) и токоъемной пластины плоские на макроуровне и параллельны друг другу, так что а-пятна расположены равномерно по всей номинальной поверхности контакта. Это крайняя из возможных в реальности ситуаций. Другой противоположной крайней ситуацией, возможной в реальности, будет контакт через одно большое а-пятно. К примеру, такое может произойти, когда касание рабочих поверхностей КП и пластины происходит под углом. Авторы данной статьи выбрали угол 10° исходя из условий эксплуатации с учетом динамики взаимодействия токоприемника с контактной сетью. Одно большое а-пятно будет расположено вдоль того края токоъемной пластины, который лежит в острие угла между рабочими поверхностями токоъемной пластины и КП. Методика создания модели контакта в целом такая же, что и описанная выше. Данная реальная площадь контакта A_r будет представлять собой прямоугольник, большая из сторон которого равна ширине рабочей поверхности КП (в данном случае – 7,26 мм), а вторая сторона во много раз меньше. Две контактные микрошероховатости КП и пластины будут представлять собой сильно вытянутые вдоль края пластины усеченные соприкасающиеся призмы (рисунок 8), площадь соприкосновения которых равна A_r .

Построение модели в Comsol Multiphysics и обработка результатов аналогичны случаю со множеством контактных пятен, расположенных равномерно по всей номинальной поверхности соприкосновения. При касании КП и пластины под углом с образованием одного большого вытянутого а-пятна время достижения плавления, испарения контактных пятен и

контактное напряжение не будут однозначно определяться контактной плотностью тока. Для каждой реальной площади контакта A_r эта зависимость будет своя. Данный факт объясняется тем, что при увеличении контактного усилия F контактные микрошероховатости в данном случае сминаются гораздо сильнее, чем в случае со множеством контактных пятен, расположенных равномерно по всей номинальной поверхности соприкосновения. Поэтому область наибольшего нагрева будет с увеличением F смещаться из контактных шероховатостей в глубину материала токосъемной пластины. Кроме этого даже при одном значении A_r положение наибольшей изотермы будет зависеть и от величины тока. Чем больше значение тока, а значит, и контактной плотности тока, тем ближе к поверхности соприкосновения микрошероховатостей будет сдвигаться область наибольшего нагрева, а это означает, что потребуются нагреть до температуры плавления (испарения) меньший объем материала, при этом затратив меньше энергии за меньшее время. Этим можно объяснить резкое падение графика зависимости времени достижения плавления и испарения контактных пятен от контактной плотности тока на рисунке 7.

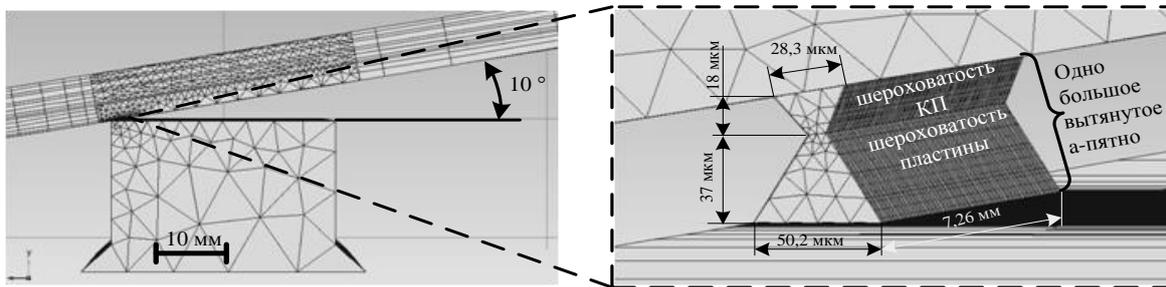


Рисунок 8 – Расчетная сетка при касании контактного провода и графитовой токосъемной пластины под углом в 10° ($A_r = 0,05 \text{ мм}^2$)

При анализе результатов, полученных на конечно-элементной модели, следует учитывать, что геометрия модели не может изменяться. В реальности контакты могут размягчаться, контактные пятна могут расплавляться, взамен них образуются новые и т. д. Поэтому основным фактором для корректного сопоставления результатов моделирования с известными практическими данными будет время достижения рассматриваемого состояния. В литературе часто встречаются ссылки на опытные значения напряжения размягчения и напряжения плавления металла электрического контакта. Эти данные (особенно напряжение размягчения) получают за относительно большой промежуток времени: секунды или десятки секунд. Напряжение плавления в контакте «контактный провод – токосъемная пластина», полученное на модели за подобный период времени, для пластин из графита составляет 2,5 – 3 В, для пластин из ВЖЗП – 0,56 – 0,65 В. Для сравнения: значение напряжения плавления, взятое из литературы [5], для контактной пары «медь – медь» равняется 0,43 В, для пары «сталь – сталь» – 0,6 В, для пары «графит – графит» – 5 В. Однако, подавая через электрический контакт кратковременные импульсы тока такой величины, чтобы достичь при данном контактом усилии необходимой контактной плотности тока, можно получить контактное напряжение даже на зачищенных поверхностях, превышающее напряжение плавления в два – три раза. Если еще увеличивать контактную плотность тока (уменьшая усилие или увеличивая величину тока) и уменьшать время импульса, можно добиться возникновения искрового (дугового) разряда без разрыва контакта. Это подтверждает правильность модели на качественном уровне. С помощью специальной установки авторы данной статьи многократно экспериментально наблюдали данный эффект. Подобное часто встречается в эксплуатации, когда при малом нажатии токоприемника на контактный провод и больших значениях тока происходит искрение. Данный эффект происходит вследствие того, что при определенной контактной плотности тока а-пятна выкипают (выгорают) быстрее, чем успевают образовываться новые. В том месте, где выгорает последнее контактное пятно, образуется искровой (дуговой) разряд в воздухе.

В эксплуатации дуговой (искровой) износ является серьезной проблемой, сокращающей срок службы контактного провода и токосъемных пластин полоза токоприемника. По результатам расчета на модели можно предсказать, возникнет дуга или нет при заданных условиях. По мере нагрева контактных пятен твердость материала уменьшается, это ведет к тому, что внешняя сила становится больше силы реакции поверхности. Контактные поверхности начнут сближаться с ускорением, пропорциональным разности этих сил. В момент расплавления а-пятен сила реакции будет стремиться к нулю. В момент испарения контактных пятен возникнет дуга (искра). Если время достижения плавления будет составлять несколько десятков секунд, то высока вероятность возникновения новых контактных пятен из-за размягчения материала. Если время достижения плавления составляет доли секунд, то это вряд ли произойдет. В этом случае нужно определить, на какое расстояние успеют приблизиться контактные поверхности от момента плавления до момента испарения а-пятен. К примеру, для графитовой токосъемной пластины при касании КП под углом с силой 17,1 Н, при токе 700 А разность между временем испарения и плавления контактных пятен составляет 0,05 с, а при токе 1500 А – уже 10 мкс. Считая силу реакции после плавления а-пятен близкой к нулю и приняв массу полоза 8 кг, легко определить, что за данное время в первом случае поверхности успеют сблизиться на 430 мкм, во втором – на 0,11 мкм. В первом случае это расстояние во много раз превышает высоту расплавленных микрошероховатостей, а значит, успеют образоваться множество новых контактных пятен. Во втором случае расстояние соизмеримо с размерами атомов и новые пятна контакта не успеют образоваться. Даже при уменьшении (увеличении) массы полоза в два раза результат принципиально не меняется. Исходя из этого можно с большой долей вероятности предположить, что при касании графитовой токосъемной пластины КП под углом и нажатии в 17,1 Н при неподвижном токоприемнике дуга образуется при токе 1500 А, а при токе 700 А – нет. Аналогичные расчеты были произведены для всего диапазона значений тока и контактных усилий рассмотренных в модели двух различных ситуаций касания КП и пластины. Результат этих расчетов без движения пластины вдоль КП приведен на рисунке 9.

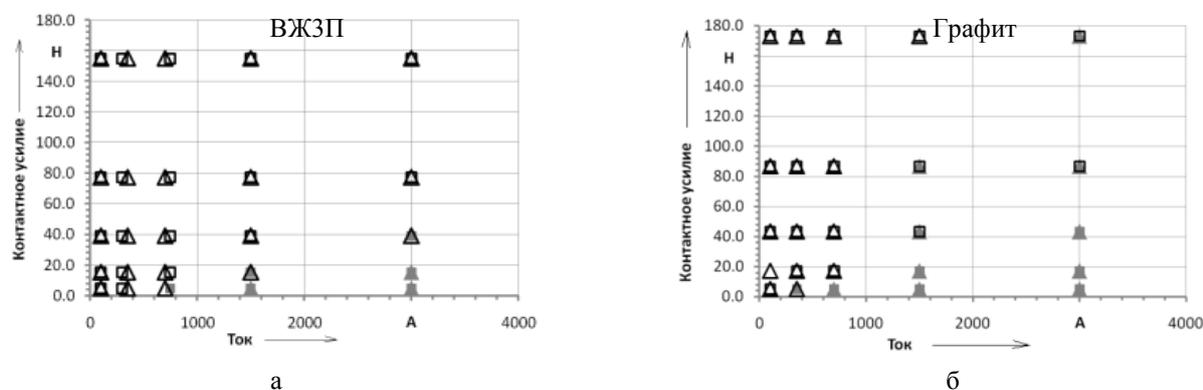


Рисунок 9 – График возникновения дугового (искрового) разряда в зависимости от контактного усилия и величины тока, полученный на модели (закрашен – разряд возникнет, не закрашен – не возникнет, квадрат – случай с равномерным расположением а-пятен по всей номинальной площади контакта, треугольник – случай касания пластины и КП под углом с образованием одного большого вытянутого а-пятна)

Из рисунка 9 следует, что токосъемная пластина из ВЖЗП по сравнению с пластиной из графита позволяет снимать с КП при одних и тех же контактных усилиях большие величины токов без образования дуги. Есть диапазон соотношения контактных усилий и тока, при которых возникновение дуги будет зависеть от типа касания КП и пластины. Авторы данной статьи предложили способ управления нажатием токоприемника в зависимости от величины тока и скорости движения электроподвижного состава таким образом, чтобы суммарная энергия (включая электрическую и механическую составляющие), выделяющаяся в контактных пятнах КП и пластины, была наименьшей. Исходя из общих положений термодинамики такое состояние должно соответствовать минимуму деградации рассматриваемой контактной пары. На данный способ управления токоприемником авторы имеют патент [7].

Результаты, полученные на данной модели при неподвижных контактах, можно использовать в качестве первого приближения для того, чтобы при любом значении тока задать нижнюю границу контактного нажатия (усилия), исключая появление дуги (искры).

Список литературы

1. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с.
2. Мохель, А. Н. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии двух резко различных по протяженности масштабов шероховатости их границ [Текст] / А. Н. Мохель, Р. Л. Салганик, А. А. Федотов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 61 – 68
3. Вукса, G. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system [Текст] / G. Вукса, А. Collina // Wear 266. – 2009. – Р. 46 – 59.
4. Химическая энциклопедия [Текст]. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 623 с.
5. Бредихин, А. Н. Электрические контактные соединения [Текст] / А. Н. Бредихин, М. В. Хомяков. – М.: Энергия, 1980. – 168 с.
6. Огар, П. М. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход [Текст] / П. М. Огар, Д. Б. Горохов // Братский гос. ун-т. – Братск, 2007. – 171 с.
7. Пат. 124478 Российская Федерация МПК U1 B60L 5/00. Токоприемник транспортного средства [Текст] / А. В. Ефимов (Россия). – № 2012130080; Заявлено 16.07.2012; Опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3.
8. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и полوزه токоприемника при токосъеме [Текст] / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 4 (23). – С. 82 – 84.
9. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода [Текст] / А. В. Паранин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 4 (23). – С. 85 – 88.

УДК 004.021

С. С. Грицуненко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМУМА КОЛИЧЕСТВА ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОЛИНОМА ПРИ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ СКОРОСТИ И КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛОКОМОТИВА

В статье определяется минимум количества операций, которые необходимо произвести для вычисления обычного полинома. Результаты исследования оформлены в виде доказательства одной леммы и одной теоремы.

В настоящее время на железнодорожном транспорте идет масштабное внедрение новой вычислительной техники, выполняющей задачи управления и анализа информации в реальном масштабе времени. Например, актуальным является прогнозирование положения локомотива и его скорости по дискретным данным, предоставляемым датчиком GPS/ГЛОНАСС. Другими словами, речь идет об экстраполяции.

Одним из наиболее популярных численных методов решения этой задачи является экстраполяция полиномом. При реализации вычислений на бортовом компьютере важную роль играет число операций, которые необходимо осуществить для вычисления той или иной формулы [1 – 6]. В данной статье определяется минимум операций для вычисления обычного полинома в том случае, если производятся только операции умножения и сложения. Основная теорема, приведенная в настоящей работе, строится на вспомогательной лемме [7].

Лемма: В случае вычисления полинома с использованием только операций «сложение» и «умножение» истинны следующие утверждения.

Нижняя граница суммарного количества операций для полинома вида

$$\sum_{n=0}^{N-1} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n + \dots + a_{N-1} x^{N-1} \quad (1)$$

равна $2N - 2$.

Вычисление полинома

$$\sum_{n=0}^{N-1} a_n x^n + Gx^N = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n + \dots + a_{N-1} x^{N-1} + Gx^N, \quad (2)$$

где G – любой полином с целыми неотрицательными степенями, невозможно за суммарное количество операций $2N - 2$ или менее.

Для доказательства этих утверждений используем метод математической индукции.

Действительно, для случая $N = 1$ полином (1) имеет вид: a_0 .

Очевидно, что минимальное суммарное количество бинарных операций, к которым относятся «сложение» и «умножение», при вычислении этой формулы равно нулю, что удовлетворяет первому утверждению доказываемой леммы. Очевидно также, что за ноль операций вычислить полином $a_0 + Gx$ не представляется возможным.

Теперь предположим, что для $N = k$ оба утверждения доказываемой леммы верны. Тогда доказательство для случая $N = k + 1$ имеет смысл провести «от противного».

Итак, пусть для случая $N = k + 1$ доказываемая лемма не выполняется, т. е. можно вычислить полином вида

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + a_k x^k \quad (3)$$

за суммарное количество бинарных операций, меньшее, чем $2k$. Это приводит к следующим выводам.

Рассмотрим, каким образом в любой алгоритм вычисления полинома (3) можно включить коэффициент a_k . Так как мы используем только две операции, то включение возможно только двумя способами:

при помощи бинарной операции «умножения»:

$$P_{r+1} = a_k P_r; \quad (4)$$

при помощи бинарной операции «сложение»:

$$P_{r+1} = a_k + P_r, \quad (5)$$

где P_r и P_{r+1} – некие промежуточные результаты.

Рассмотрим способ 1 включения коэффициента a_k .

Если коэффициент a_k приравнять к нулю, то полином (3) очевидным образом преобразуется в полином

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1}. \quad (6)$$

В этом случае промежуточный результат $P_{r+1} = a_k P_r$ можно не вычислять, так как он и так известен: $P_{r+1} = 0$. Это позволяет сэкономить одну операцию, но промежуточный результат P_{r+1} сам является операндом очередной бинарной операции: либо $P_{r+2} = P_l P_{r+1}$, либо $P_{r+2} = P_l + P_{r+1}$, где P_l – тоже какой-то промежуточный результат. Следовательно, P_{r+2} также нет необходимости вычислять, ибо он равен либо нулю, либо P_l . Таким образом, мы эконо-

минимум две операции, и если полином (3) может быть вычислен менее чем за $2k$ операций, то полином (6) может быть вычислен менее чем за $2k - 2$ операций, а это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Замечание: умножение $P_{r+1} = a_k P_r$ не может быть конечной операцией в вычислении полинома (т. е. обязательно существует и результат P_{r+2}), так как в противном случае получается, что

$$P_r = \frac{1}{a_k} a_0 + \frac{1}{a_k} a_1 x + \frac{1}{a_k} a_2 x^2 + \dots + \frac{1}{a_k} a_{k-1} x^{k-1} + x^k, \quad (7)$$

т. е. результат P_r зависит, от еще не включенного коэффициента a_k .

Исследуем способ 2 включения коэффициента a_k .

Сначала рассмотрим случай, когда a_k включается в вычисления (служит операндом бинарной операции) более чем один раз. В этом случае должны быть как минимум две операции: $P_{r+1} = a_k + P_r$ и $P_{l+1} = a_k + P_l$. Очевидно, что при $a_k = 0$ данные операции можно опустить, так как $P_{r+1} = P_r$ и $P_{l+1} = P_l$. При этом полином (3) обращается в полином (6) и если полином (3) вычислялся менее чем за $2k$ операций, то полином (6) может быть вычислен менее чем за $2k - 2$ операций, а это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Теперь рассмотрим случай, когда a_k включается в вычисления (служит операндом бинарной операции) только один раз. Тогда схема включения коэффициента a_k имеет вид:

$$P_{r+2} = (a_k + P_r + P_l + \dots) P_{r+1} = (a_k + G) P_{r+1}, \quad (8)$$

где $P_r, P_{r+1}, P_{r+2}, P_l$ – некоторые промежуточные результаты.

Замечание: умножение на P_{r+1} (и, следовательно, существование результата P_{r+2}) обязательно, так как если вообще никакого умножения a_k не будет, то член $a_k x^k$ в полиноме (3) получить невозможно, а это необходимо в случае равенства нулю всех коэффициентов a_n кроме коэффициента с индексом $n = k$.

Так как мы используем только операции «сложение» и «умножение», а исходные данные для вычисления это коэффициенты a_n и переменная x , то выражение $P_r + P_l + \dots = G$ является обычным полиномом с целыми неотрицательными степенями. Поэтому если a_k включается через операцию сложения с полиномом G , то должен быть механизм компенсации появления в результате полинома $x^k G$, так как иначе имеем:

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + (a_k + G) x^k = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + a_k x^k + x^k G. \quad (9)$$

При этом механизм компенсации должен иметь вид:

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + (a_k + G) x^k + (-1) x^k G = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + a_k x^k. \quad (10)$$

Следовательно, если мы приравняем к нулю a_k и исключим из вычислений операцию $a_k + G$, то формула (8) приобретет вид:

$$P_{r+2} = (a_k + G) P_{r+1} = 0 \cdot P_{r+1} = 0, \quad (11)$$

а это означает, что промежуточный результат P_{r+2} вычислять нет необходимости. И мы экономим минимум две операции, а сам полином (10) преобразуется из-за упомянутого механизма компенсации в полином вида:

$$a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + (-1) x^k G. \quad (12)$$

При этом если исходный полином (10) вычислялся менее чем за $2k$ операций, то полученный полином (12) будет вычисляться даже менее чем за $2k - 2$ операций, а это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Наконец, докажем вторую часть леммы для случая $N = k + 1$: вычисление полинома

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{k-1}x^{k-1} + a_kx^k + x^{k+1}Q \quad (13)$$

невозможно за количество операций $2k$ или менее. Доказательство продолжаем вести от противного.

Предположим, что полином (13) может быть вычислен за количество операций $2k$ или менее. Тогда если мы включаем a_k при помощи бинарной операции «умножения» согласно формуле (4), в случае $a_k = 0$ получается, что полином (13) преобразуется в полином

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{k-1}x^{k-1} + x^{k+1}Q. \quad (14)$$

За счет экономии двух операций данный полином может быть вычислен уже за $2k - 2$ операций, но это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Отдельно рассмотрим случай, когда мы включаем в вычисления коэффициент a_k при помощи бинарной операции «сложение» согласно формуле (5). Тогда если a_k включается минимум дважды, то за счет обнуления a_k мы, как было описано выше, экономим две операции, а сам полином (13) преобразуется в полином (14). Другими словами, полином (14) можно вычислить за $2k - 2$ операций, но это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Если же a_k включается в вычисления только один раз и при помощи бинарной операции сложения, то тогда необходим описанный выше механизм компенсации полинома x^kG . Это в свою очередь приводит к двум вариантам при приравнивании к нулю a_k и исключению суммирования полинома G с a_k .

Вариант 1. Компенсаторный механизм порождает полином x^kG , и экономится минимум две операции. В итоге получается полином вида

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{k-1}x^{k-1} + x^kG + x^{k+1}Q, \quad (15)$$

который вычисляется за $2k - 2$ операций, а это противоречит нашему предположению для случая $N = k$.

Вариант 2. Компенсаторный механизм порождает не полином x^kG , а полином $(-1)x^{k+1}Q$. Как было показано выше, если коэффициент a_k включается согласно формуле (8), то когда мы приравняем к нулю a_k и исключаем из вычислений операцию $a_k + G$, при этом экономится не менее двух операций, а фактически экономия составляет не менее трех операций. Это является следствием того, что в этом случае $P_{r+2} = 0$. Следующий результат P_{r+3} тоже нет необходимости вычислять, так как

$$P_{r+3} = P_{r+2}P_l = 0 \cdot P_l = 0 \quad (16)$$

либо

$$P_{r+3} = P_{r+2} + P_l = 0 + P_l = P_l. \quad (17)$$

Замечание: существование результата P_{r+3} (иначе говоря, вычисления на результате P_{r+2} не заканчиваются и есть возможность сэкономить минимум три операции) можно

обосновать от обратного. Если P_{r+2} – последний результат, то последнюю операцию при вычислении полинома можно выразить формулой:

$$P_{r+2} = (a_k + G)P_{r+1} = a_k P_{r+1} + GP_{r+1}. \quad (18)$$

Тогда если $P_{r+1} = x^k$, то очевидно в получаемом полиноме не будут присутствовать члены со степенью ниже k , а именно a_0 , a_1x , a_2x^2 и т. д. Если же $P_{r+1} \neq x^k$, то в получаемом полиноме уже будут присутствовать члены, содержащие a_k , но отличные от $a_k x^k$, т. е. на их устранение потребуются дополнительные операции.

В итоге получается полином вида

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{k-1}x^{k-1} + x^{k+1}Q + (-1)x^{k+1}Q = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{k-1}x^{k-1}, \quad (19)$$

который вычисляется менее чем за $2k - 2$ операций, а это противоречит нашему предположению для случая $N = k$, что и требовалось доказать.

Теперь докажем теорему о минимальном количестве операций при вычислении полинома.

Теорема: вычисления полинома вида

$$\sum_{n=0}^N a_n x^n = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_n x^n + \dots + a_N x^N \quad (20)$$

возможно только за $2N$ операций «сложение» и «умножение».

Как следует из доказанной выше леммы, минимальная граница количества операций «сложение» и «умножение» для вычисления полинома равна $2N$, но известная схема Горнера позволяет вычислять полином именно за $2N$ операций:

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_N x^N = a_0 + (a_1 + (\dots(a_{N-2} + (a_{N-1} + a_N x)x)\dots)x)x. \quad (21)$$

Следовательно, нижняя оценка оказывается точной, что и требовалось доказать.

Список литературы.

1. Альтман, Е. А. Повышение эффективности метода перекрытия с накоплением для вычисления дискретной свертки [Текст] / Е. А. Альтман, С. С. Грицутенко // Вопросы радиоэлектроники / ОАО ЦНИИ «Электроника». – М. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 88 – 96.
2. Грицутенко, С. С. Распараллеливание алгоритма быстрого преобразования фурье на несколько DSP-ядер с линковыми портами [Текст] / С. С. Грицутенко, А. С. Сидоренко // Вопросы радиоэлектроники / ОАО ЦНИИ «Электроника». – М. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 97 – 103.
3. Черемисин, В. Т. Особенности построения алгоритмов измерения показателей качества электроэнергии в тяговых сетях электрифицированных железных дорог [Текст] / В. Т. Черемисин, С. С. Грицутенко // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2007. – № 2. – С. 2 – 5.
4. Грицутенко, С. С. Быстрые алгоритмы [Текст] / С. С. Грицутенко // Вестник Ижевского гос. техн. ун-та / Ижевский гос. техн. ун-т. – Ижевск. – 2010. – № 4. – С. 169 – 172.
5. Королева, К. А. Применение метода оптимальной интерполяции вектором, нейтральным по свертке в приемном тракте коммуникационного железнодорожного оборудования [Текст] / К. А. Королева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 2 (14). – С. 90 – 96.
6. Королева, К. А. Метод оптимальной интерполяции нейтральным по свертке вектором, определенным на пространстве Гильберта [Текст] / К. А. Королева // Омский научный вестник / Омский гос. политехн. ун-т. – Омск. – 2013. – № 2 (120). – С. 283 – 286.
7. Грицутенко, С. С. Повышение достоверности измерения показателей качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения [Текст] / С. С. Грицутенко: Дис... канд. техн. наук. – Омск, 2007. – 154 с.

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

В статье рассмотрена методика расчета экранирующих оболочек радиоэлектронной аппаратуры. Проведено исследование однослойных и многослойных экранов, состоящих из алюминия, меди и стали. Выполнено моделирование воздействия импульсного электромагнитного поля на экран из проводящего материала с использованием метода конечных разностей во временной области. Приведены временные зависимости сопротивления экранов. Представлены примеры картины распределения электромагнитного поля в окружающем экран пространстве. Приведены примеры временных зависимостей электрического поля на внешней и внутренней границах экрана, наглядно показывающие ослабление импульсного электромагнитного поля.

Традиционным средством защиты радиоэлектронной аппаратуры от электромагнитных полей является экранирование. Экраном может быть сплошная металлическая оболочка, покрытие из проводящей краски, композитных материалов, сетки определенной ячеистости и т. д. Практически всегда экранирующая оболочка имеет технологические отверстия, через которые осуществляются вентиляция, визуальный контроль, заводятся кабели питания и связи. Ослабление электромагнитного поля зависит от размеров и количества отверстий, а также от частотного диапазона влияющего поля.

Наиболее опасными для чувствительной радиоэлектронной аппаратуры являются импульсные помехи. Источниками появления импульсных помех являются искровые процессы в контактной сети железных дорог, короткие замыкания в ЛЭП, грозовые разряды, радиопередающие и радиолокационные приборы и т. д. Импульсные электромагнитные поля характеризуются высокой проникающей способностью за счет наличия широкого спектра частот. При этом воздействие одних частот эффективно подавляется, а другие, не получив требуемого ослабления, проникают внутрь топологического объема аппаратуры, вызывают появление наведенных ЭДС на радиоэлектронных платах. Одной из худших ситуаций считается та, при которой частотные характеристики воздействующего электромагнитного поля совпадают с частотами сигналов в цепях аппаратуры. В этом случае для радиоэлектронной аппаратуры, имеющей цифровые и микропроцессорные устройства, возрастает риск возникновения сбоя или нестабильной работы.

Оценка стойкости аппаратуры к электромагнитным полям является сложной задачей, поскольку на этапе разработки трудно учесть все возможные условия, в которых будет работать система. Для решения такой задачи применяются расчетные и экспериментальные методы. Экспериментальные методы дают наиболее точные и наглядные результаты, но проведение таких испытаний требует много времени и специального аппаратного обеспечения. Расчетные методы не требуют особых затрат, но имеют серьезные недостатки.

Существующие методы расчета электромагнитных экранов можно разбить на аналитические [1 – 3] и численные [6, 8, 10]. Основным недостатком аналитических методов является невысокая точность при расчете экранов сложной формы: заданный экран заменяется идеализированной формой (шар, цилиндр, плоскость) эквивалентного размера. К наиболее популярным численным методам, основанным на решении уравнений Максвелла, относятся метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD). Недостатки обоих методов заключаются в необходимости значительных вычислительных ресурсов и большем времени расчета, чем на основе аналитических выражений. Однако возможность задания трехмерных объектов с учетом особенностей формы и неоднородностей в структуре позволяет оценивать экранирующие оболочки с большой точностью.

Для задач исследования электромагнитного поля в ограниченном объеме возможности обоих упомянутых расчетных методов примерно равны. В данной статье описана методика, основанная на методе конечных разностей во временной области, поскольку он, по сравнению с методом конечных элементов, более простой, наглядный и интуитивно понятный.

При численном решении уравнений Максвелла методом FDTD предварительно задается сетка счетного объема, обычно имеющего форму куба или параллелепипеда. Точность расчета обеспечивается выбором размера ячейки сетки: одной длине волны электромагнитных колебаний с максимально интересующей частотой должно соответствовать не менее 20 – 30 ячеек. Затем в каждой ячейке в процессе моделирования по очереди проводится расчет напряженности электрического и магнитного полей. Процесс вычисления ведется в трех координатных плоскостях по идентичным формулам. Подобно вычислению напряженности полей вдоль оси X расчетные выражения имеют вид [10]:

$$E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} = C_a^{Ex} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + C_b^{Ex} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2} \times \left(H_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n + H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n \right); \quad (1)$$

$$H_x \Big|_{i-1/2,j+1,k+1}^{n+1} = H_x \Big|_{i-1/2,j+1,k+1}^n + C^{Hx} \Big|_{i-1/2,j+1,k+1} \times \left(E_y \Big|_{i-1/2,j+1,k+3/2}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i-1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2} + E_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i-1/2,j+3/2,k+1}^{n+1/2} \right); \quad (2)$$

где i, j, k – координаты элементарной ячейки счетного объема, в которой определяются компоненты электромагнитного поля; n – номер временного шага; C_a^E, C_b^E, C^H – коэффициенты, рассчитываемые по формулам [10]:

$$C_a^E = \frac{1 - \sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}} \Big/ \frac{1 + \sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}; \quad (3)$$

$$C_b^E = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k} \cdot \Delta h} \Big/ \frac{1 + \sigma_{i,j,k} \cdot \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}; \quad (4)$$

$$C^H = \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k} \cdot \Delta h}; \quad (5)$$

где $\varepsilon_{i,j,k}, \sigma_{i,j,k}, \mu_{i,j,k}$ – диэлектрическая проницаемость, проводимость и магнитная проницаемость среды для ячейки счетного объема с координатами i, j, k ; Δt – шаг приращения времени; Δh – размер элементарной ячейки пространства в случае кубической формы.

Электромагнитное поле в среде с большой проводимостью затухает достаточно резко, поэтому адекватный расчет ослабления электромагнитной волны в толще экрана требует очень малых размеров ячейки – десятые и сотые доли миллиметра. Это значительно увеличивает количество ячеек счетного пространства при равномерном разбиении и делает процесс расчета практически невозможным вследствие ограниченности объема оперативной памяти.

Данное ограничение можно обойти, используя граничные условия Леонтовича и аналогию распространения электромагнитных волн в пространстве и на длинной линии [4, 5]. При этой аналогии экранирующая оболочка разбивается на элементарные ячейки, каждая из которых представляется плоским экраном, на который падает электромагнитная волна. При этом процесс проникновения электромагнитного поля за плоскость экрана описывается системой уравнений с Z-параметрами [9]:

$$\begin{bmatrix} E_0(\omega) \\ E_l(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & -Z_{12}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & -Z_{22}(\omega) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_0(\omega) \\ H_l(\omega) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где E_0, H_0, E_l, H_l – напряженность электрического и магнитного полей на внешней и внутренней поверхностях экрана; Z_{11}, Z_{22} – поверхностные сопротивления экрана, Z_{12}, Z_{21} – сопротивления, определяющие ослабление электромагнитного поля в толще проводящей оболочки.

По сравнению с экранами, изготовленными из одного материала, лучшими экранирующими свойствами характеризуются многослойные экраны. Пример двухслойной оболочки приведен на рисунке 1, а. В литературе по FDTD расчет многослойных экранирующих оболочек не рассматривался, но напряженность электрического поля в выражении (6) для многослойного экрана можно определить, если известны Z-параметры всей структуры, которые могут быть выражены из системы A-параметров [4], а эта система получается последовательным перемножением матриц A-параметров каждого слоя (рисунок 1, б).

Переход во временную область через обратное преобразование Фурье даст выражения, расчет по которым можно внедрить в алгоритм FDTD [9]:

$$\begin{cases} E_0(t) = \zeta_{11}(t) * \frac{\partial H_0(t)}{\partial t} - \zeta_{12}(t) * \frac{\partial H_1(t)}{\partial t}; \\ E_1(t) = \zeta_{21}(t) * \frac{\partial H_0(t)}{\partial t} - \zeta_{22}(t) * \frac{\partial H_1(t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\zeta(t) = F^{-1}\{Z(\omega)/j\omega\}$ – результат обратного преобразования Фурье каждого из соответствующих Z-параметров; «*» – операция свертки.

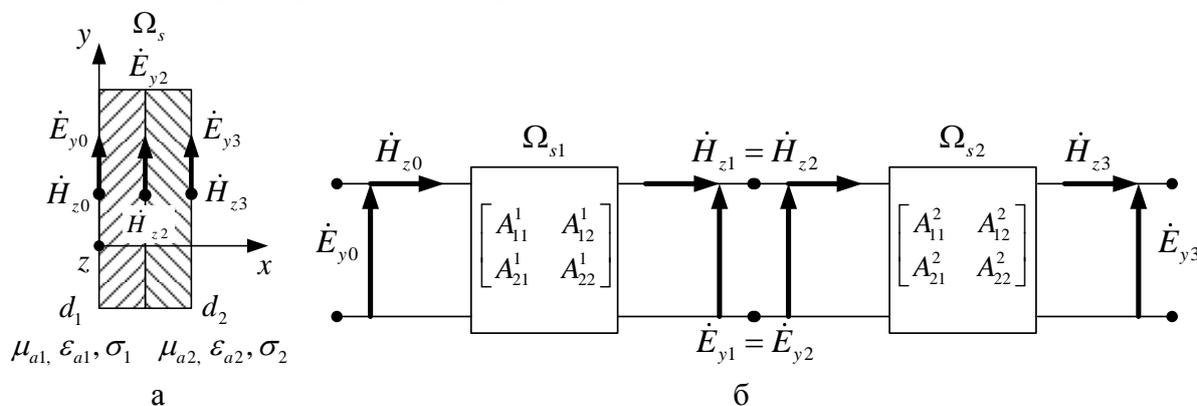


Рисунок 1 – Элемент двухслойной экранирующей оболочки (а) и модель расчета параметров экрана (б)

Выполнение свертки в выражении (7) требует сохранения всех прошлых значений параметров $\zeta(t)$ и производных $\partial H(t)/\partial t$, что значительно увеличивает потребность в вычислительных ресурсах и существенно замедляет процесс расчета. Поэтому для параметров $\zeta(t)$ были найдены аналитические выражения посредством аппроксимации методом Прони с использованием базиса экспоненциальных функций [7]:

$$\zeta(t) = \zeta(N \cdot \Delta t) = \sum_{i=0}^{NP-1} C_i e^{s_i \Delta t N} = \sum_{i=0}^{NP-1} C_i \mu_i^N, \quad (8)$$

где N – это номер временного шага; Δt – временной шаг; NP – количество аппроксимирующих экспонент; C_i – коэффициент при экспоненте, определяемый методом наименьших квадратов; s_i – комплексная частота; $\mu_i = e^{s_i \Delta t}$.

На рисунке 2 показаны временные зависимости сопротивлений экрана ζ_{11} и ζ_{21} для одно-, двух- и трехслойных экранов общей толщиной 0,5 мм, имеющих слои из стали, алюминия и меди. Эти параметры позволяют определить значения напряженности электрического поля на внешней и внутренней границах раздела сред «воздух – металл». Точки на графиках показывают значения, полученные в результате аппроксимации методом Прони. Погрешность аппроксимации составляет менее 1 %. Характер зависимостей ζ_{11} говорит о том, что чем выше частота воздействующего электромагнитного поля, тем больше будут поверхностные токи на внешней границе экрана. Зависимости ζ_{21} показывают, что низкочастотные поля будут сильнее проникать за экран. На графиках рисунка 2 параметры ζ_{21} в области более короткого

времени близки к нулю, а это значит, что высокочастотные поля претерпевают наибольшее ослабление. Медный и алюминиевый экраны оказывают большее затухание, чем стальной, но магнитные свойства стали проявляются в лучшем подавлении высокочастотных электромагнитных полей. Как видно из рисунка 2, комбинация из трех слоев позволяет объединить преимущества магнитных и немагнитных металлов.

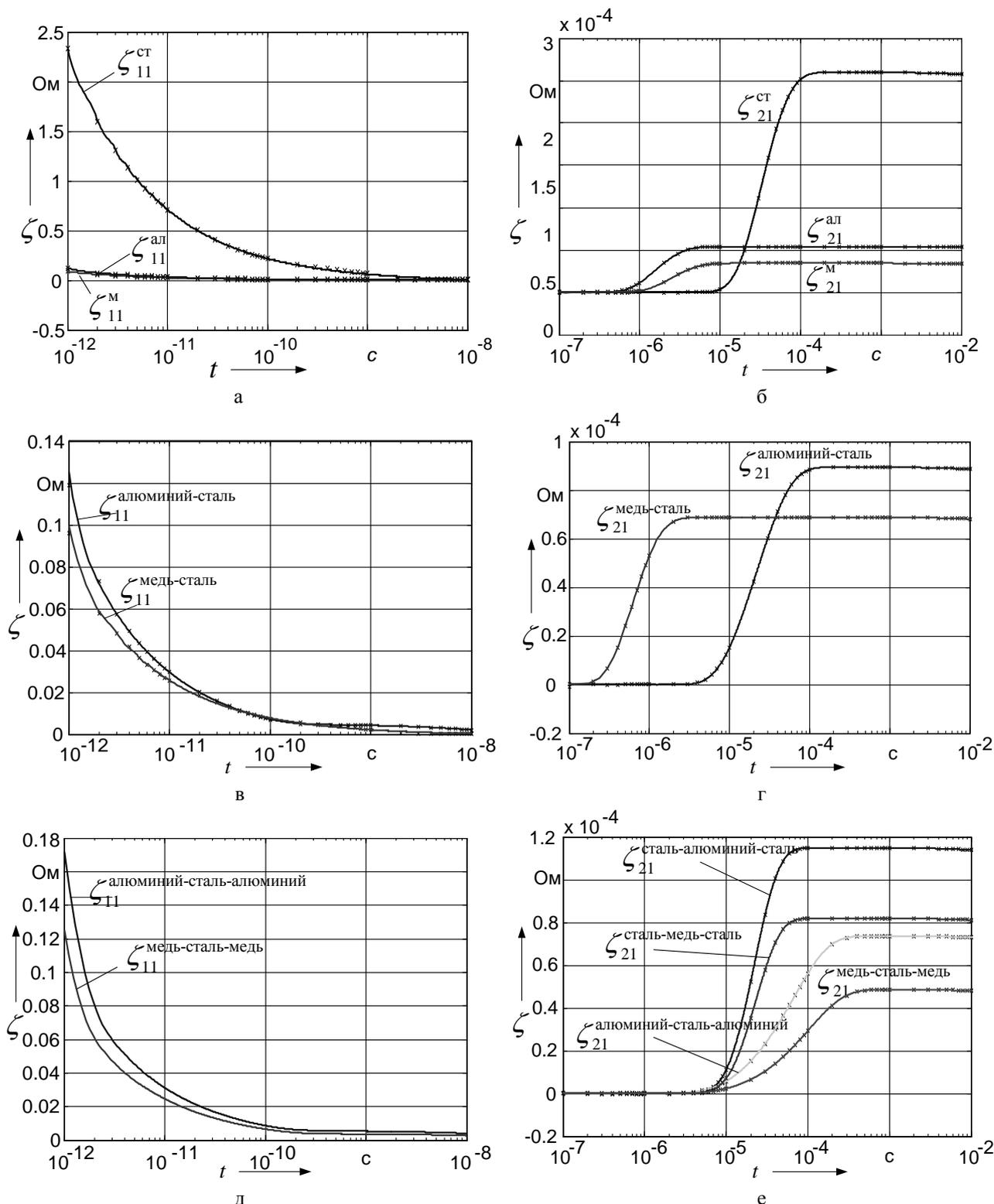


Рисунок 2 – Временные зависимости параметров $\zeta_{11}(t)$, $\zeta_{21}(t)$ и результаты аппроксимации (x) экранов толщиной 0,5 мм: сталь, алюминий и медь (а, б); алюминий – сталь и медь – сталь (в, г); алюминий – сталь – алюминий, медь – сталь – медь, сталь – алюминий – сталь, сталь – медь – сталь (д, е)

Применение базиса экспоненциальных функций для аналитического описания временных зависимостей сопротивлений экрана позволяет использовать рекуррентную свертку вместо обычной, что дает возможность сократить время расчета и объем используемой оперативной памяти. Значение свертки на каждом шаге времени N рассчитывается выражениями [7]:

$$\zeta(t) * \frac{\partial H(t)}{\partial t} \Big|_N = \sum_{i=0}^{N-1} \psi_i \Big|_N; \quad (9)$$

$$\psi_i \Big|_N = \left(H^{N-1/2} - H^{N-3/2} \right) \cdot C_i e^{s_i} + e^{s_i} \cdot \psi_i \Big|_{N-1}, \quad (10)$$

где $H^{N-1/2}$ и $H^{N-3/2}$ – последнее и предпоследнее рассчитанные значения напряженности магнитного поля на поверхности экрана соответственно.

В формуле рекуррентной свертки (10) требуются значения напряженности магнитного поля только за последние два временных шага, а не вся история. Значение вспомогательного параметра $\psi_i \Big|_N$ высчитывается на основе значения, полученного в предыдущий момент времени. Такой порядок вычислений можно внедрить в алгоритм расчета методом FDTD. Алгоритм расчета был реализован авторами на языке MatLab.

На рисунке 3 в качестве примера показаны пространственные (x, y) картины распределения электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей в моменты времени 750 нс и 1 мкс от начала процесса моделирования. Воздействующим электромагнитным полем является плоская волна наносекундной длительности с горизонтальной поляризацией. Амплитуда электрического поля взята 100 В/м. Экран аппаратуры, показанный прямоугольником без отверстий, располагается на поверхности земли, для которой заданы параметры: проводимость $\sigma_{гр} = 0,01$ См/м и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{гр} = 5$. Таким образом, можно воссоздать любые условия работы радиоэлектронной аппаратуры.

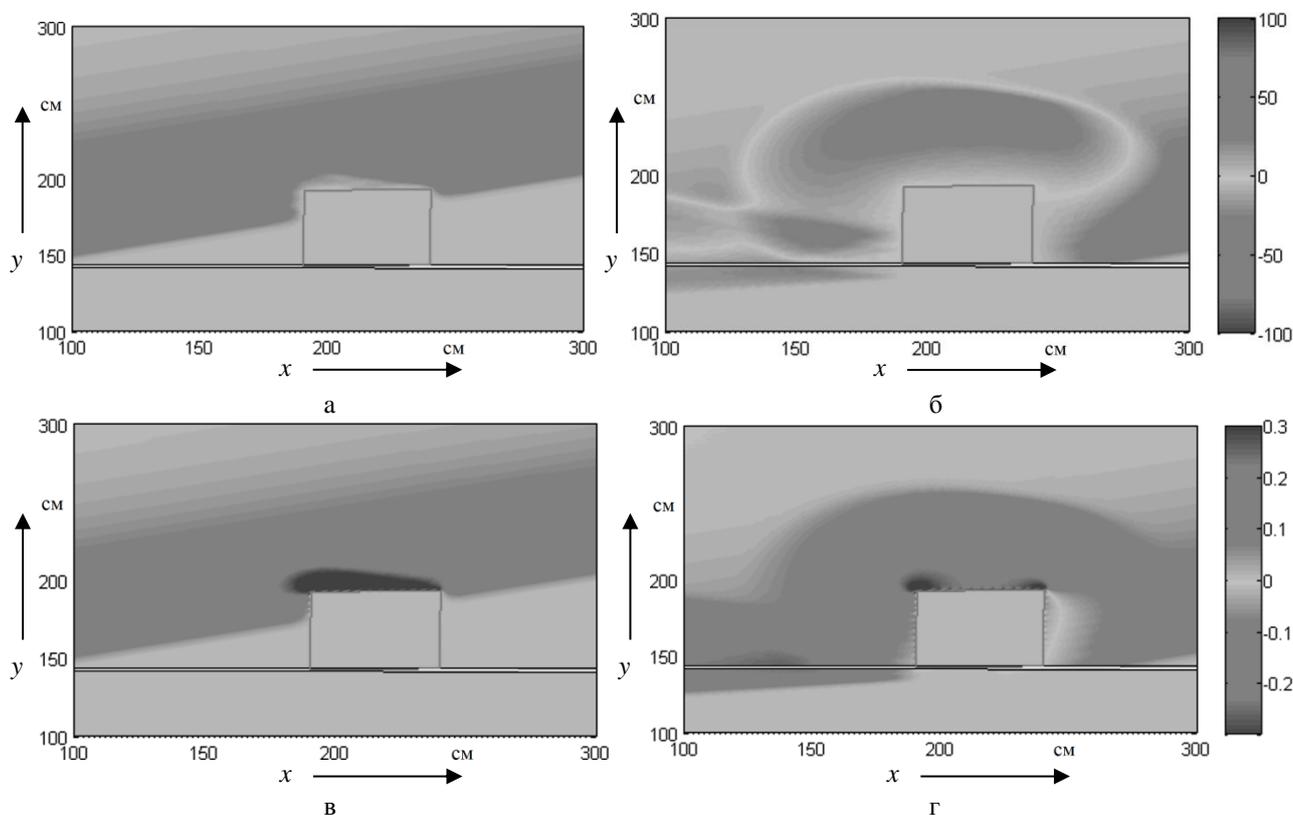


Рисунок 3 – Распределение напряженности электрического поля Ez (а, б) и магнитного поля Hx (в, г) в моменты времени 0,75 мкс и 1 мкс от начала процесса моделирования

Описанные экраны толщиной 0,5 мм были исследованы при влиянии электромагнитного поля биэкспоненциальной формы с параметрами фронта и полуспада 6,4 мкс и 16 мкс соответственно. Амплитуда электрического поля также равнялась 100 В/м. Ослабление воздействующей волны фиксировалось в двух точках-пробниках на внешней и внутренней границах экранов. На рисунке 4 показаны полученные в этих точках временные зависимости электрического поля для одно-, двух- и трехслойного экранов: сталь, алюминий – сталь и медь – сталь – медь.

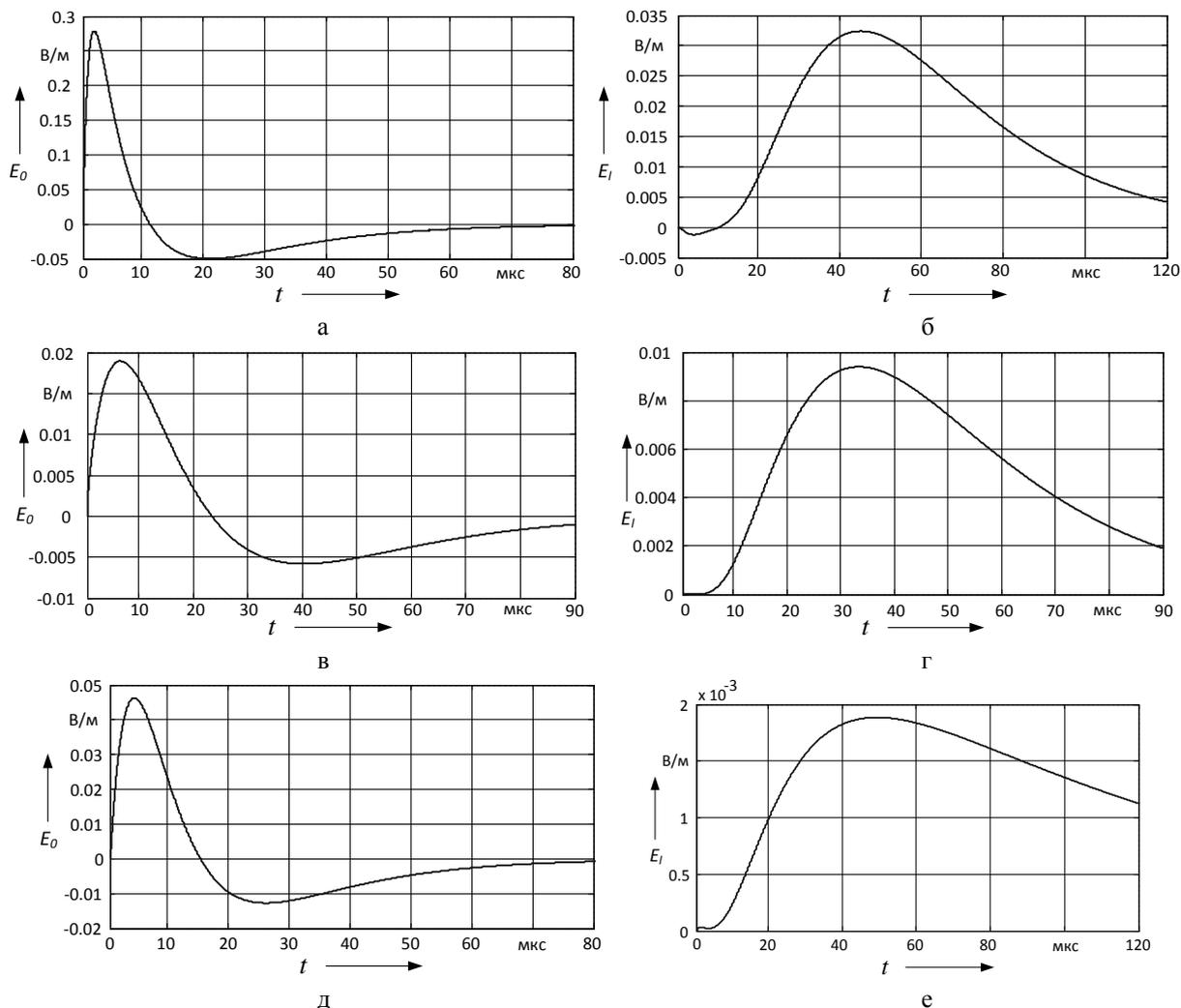


Рисунок 4 – Временные зависимости электрического поля на внешней границе экрана (слева) и за экраном (справа) при воздействии электромагнитной волны с параметрами фронта и спада 6,4/16 мкс на экран толщиной 0,5 мм: а, б – сталь; в, г – алюминий – сталь; д, е – медь – сталь – медь

Значения наводимых тока и напряжения на дорожках радиоэлектронных плат или в кабельных соединениях прямо пропорциональны скорости нарастания фронта импульса. Результаты расчетов показывают, что помимо ослабления внешнего электромагнитного поля экранирующая оболочка уменьшает скорость нарастания и спада импульса. Одним из лучших по амплитудно-временным параметрам оказался трехслойный экран медь – сталь – медь (рисунок 4, в). Для такого экрана характерно замедление импульса 6,4/16 мкс примерно в десять раз, что скажется на уменьшении наведенных напряжения и тока по сравнению с электромагнитным импульсом с исходными временными параметрами.

Эффективность экранирования оценивается при помощи экранного затухания, равного логарифму отношения напряженностей поля E или H при отсутствии и наличии экрана [2]:

$$A_э = 20 \lg \frac{E}{E_э} = 20 \lg \frac{H}{H_э}. \quad (11)$$

Графики на рисунках 4, б, г, е позволяют увидеть, насколько ослабляется электрическое поле за экраном. На основе амплитудных значений ослабленного и исходного полей можно рассчитать максимальные значения экранного затухания для приведенных примеров, дБ: 69,9, 80,9 и 94,8 соответственно.

В представленной методике экраны аппаратуры исследуются во временной области, что позволяет оценивать воздействие как гармонических, так и импульсных электромагнитных полей. Расчет экранирующих оболочек посредством аналитических выражений дает частотные зависимости, которые требуют дополнительной интерпретации.

Наиболее трудоемкими процессами в данной методике являются описание геометрической формы экрана и задание окружающего пространства, но благодаря этому процесс моделирования максимально приближен к реальности. Визуальное наблюдение распределения электрических и магнитных полей вокруг и внутри экрана позволяет наглядно определять, где не следует размещать наиболее чувствительные элементы устройств.

Список литературы

1. Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле [Текст] / В. В. Васильев, Л. Л. Коленский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 200 с.
2. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот [Текст] / И. И. Гроднев. – М.: Связь, 1972. – 112 с.
3. Каден, Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи [Текст] / Г. Каден; Пер. с нем. В. М. Лаврова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1975. – 327 с.
4. Каллер, М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник [Текст] / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
5. Лавров, В. И. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн [Текст] / В. И. Лавров. – М.: Связь, 1964. – 368 с.
6. Митра, Р. Вычислительные методы в электродинамике [Текст] / Р. Митра; Пер. с англ. под ред. Э. Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
7. Finite-difference time-domain implementation of surface impedance boundary conditions [Текст] / J. H. Beggs, R. J. Luebbers and others // IEEE Transactions on Antennas and propagation. – 1992. – Vol. 40. – № 1. – P. 49.
8. Bondeson, A. Computational Electromagnetics [Текст] / A. Bondeson, T. Rylander, P. Ingelstrom. – New York: Springer, 2005. – 244 p.
9. Feliziani, M. A Hybrid Numerical Technique to Predict the Electromagnetic Field in Penetrable Conductive Boxes [Текст] / M. Feliziani, F. Maradei // Electromagnetics. – 2002. – Vol. 22. – P. 405.
10. Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Second Edition [Текст] / A. Taflove, S. C. Hagness. – Boston: Artech House, 2000. – 866 p.

УДК 624.19.035.2

А. Л. Ланис, Ю. А. Цибариус

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ВРЕМЕННОЙ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ В РАСЧЕТАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК

Одним из наиболее распространенных видов временной крепи при строительстве транспортных тоннелей является набрызгбетонная крепь. В настоящее время учет набрызгбетонной крепи в расчетах конструкций постоянных обделок затруднителен в связи с отсутствием универсальной методики проектирования, что

влечет за собой увеличение материалоемкости конструкций и трудоемкости производимых работ. Данные о степени и характере влияния основных механических характеристик скальных грунтов и геометрических размеров сооружения на значение коэффициента учета податливой временной набрызгбетонной крепи, полученные в результате проведенных исследований, послужили основой для дальнейшей разработки универсальной методики проектирования.

В ходе теоретических исследований установлены эмпирические зависимости распределения напряжений между временной набрызгбетонной крепью и постоянной монолитной железобетонной обделкой. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния временной набрызгбетонной крепи и постоянной обделки, проведенных в натурных условиях, подтвердили возможность применения полученных в ходе теоретических исследований эмпирических зависимостей при расчете конструкций постоянных обделок тоннелей с учетом временной набрызгбетонной крепи. Использование предложенных зависимостей при проектировании конструкций обделок позволит значительно снизить материало- и трудоемкость строительства транспортных тоннелей.

Совершенствование транспортной системы и повышение эффективности ее функционирования являются необходимыми условиями развития экономики России. Для решения транспортных проблем в Российской Федерации необходимо дальнейшее развитие транспортной инфраструктуры, предусматривающее увеличение объема строительства таких важных объектов, как транспортные тоннели. Одними из основных целей Постановления Правительства Российской Федерации от 05.12.2001 г. № 848 (редакция от 02.11.2013 г.) «О Федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» являются эффективное использование финансовых средств и широкое внедрение в производственную практику новейших достижений научно-технического прогресса во всех сферах транспортного строительства, в том числе и в тоннелестроении. Эффективность процесса строительства транспортных тоннелей достигается путем повышения качества работ, увеличения скоростей проходки при оптимизации материало- и трудоемкости как основных, так и вспомогательных операций на всех этапах производственного цикла.

Одним из наиболее важных и технически сложных процессов при строительстве транспортных тоннелей, сооружаемых горным способом, является возведение временной крепи и постоянной обделки, требующее значительных материальных и трудовых затрат.

В последнее время в практике отечественного тоннелестроения отмечается существенный рост объемов применения набрызгбетона в качестве временной крепи, что позволяет получить значительный экономический эффект и обеспечить полную механизацию строительно-монтажных работ [1, 2]. Однако эффективность применения конструкций обделок тоннелей, сооружаемых горным способом, в значительной мере снижается из-за отсутствия универсальной методики учета при проектировании предварительно сооруженной временной набрызгбетонной крепи, воспринимающей значительную часть основных видов статических нагрузок, действующих на тоннель, что не позволяет оптимизировать материальные и трудовые затраты производимых строительно-монтажных работ.

Таким образом, разработка и внедрение в производственный процесс методики учета временной набрызгбетонной крепи в расчетах напряженного состояния конструкций тоннельных обделок позволит оптимизировать материальные и трудовые затраты при строительстве тоннелей, сооружаемых горным способом.

При проведении теоретических исследований необходимо было установить степень и характер влияния на напряженное состояние постоянной обделки тоннеля с учетом наличия временной набрызгбетонной крепи

- основных физико-механических характеристик грунта;
- жесткости временной набрызгбетонной крепи;
- размеров поперечного сечения тоннельной выработки.

Состав теоретических исследований представлен на рисунке 1.

Исследование напряженного состояния постоянной обделки тоннеля выполнено в программном геотехническом комплексе «*PLAXIS 3D Tunnel*» (Нидерланды). В ходе теоретических исследований оценивалось напряженное состояние обделки в трех контрольных сече-

ниях (рисунок 2). Выбор контрольных сечений обусловлен закономерностями распределения изгибающих моментов в конструкциях постоянных обделок подковообразного очертания. Подробное описание методики и промежуточных результатов выполненных теоретических исследований представлено в работах [3 – 5].

По результатам серии расчетов с использованием методов математической статистики установлены следующие соотношения, отражающие закономерности распределения напряжений в конструкциях тоннельных обделок с учетом временной набрызгбетонной крепи:

$$\gamma_{\text{нб(свод)}} = 0,2544h^{0,9064} \times \ln E_0 + 0,3695h^{-0,301}; \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{нб(полусвод)}} = 0,099h^{0,5588} \times \ln E_0 + 0,6183h^{-0,148}; \quad (2)$$

$$\gamma_{\text{нб(стена)}} = 0,2229h^{0,7827} \times \ln E_0 + 0,4988h^{-0,22}, \quad (3)$$

где E_0 – модуль деформации грунтового массива, ГПа;

h – толщина временной набрызгбетонной крепи, м.

Формулы (1) – (3) могут применяться для определения коэффициента $\gamma_{\text{нб}}$ с целью учета влияния временной крепи на напряжения, возникающие в постоянной обделке тоннеля, вызванные объемными силами тяжести, действующими в окружающем грунтовом массиве.

В процессе проведения экспериментальных исследований на опытных участках необходимо было провести натурные наблюдения за изменением напряженного состояния временной набрызгбетонной крепи и постоянной железобетонной обделки; определить фактические физико-механические и деформационно-прочностные свойства горных пород; выполнить расчет напряженного состояния постоянных обделок; с использованием методов математической статистики выполнить анализ значений нормальных тангенциальных напряжений, фактически действующих в сечениях постоянной обделки, в сравнении с расчетными значениями, определенными по существующей методике проектирования, и значе-

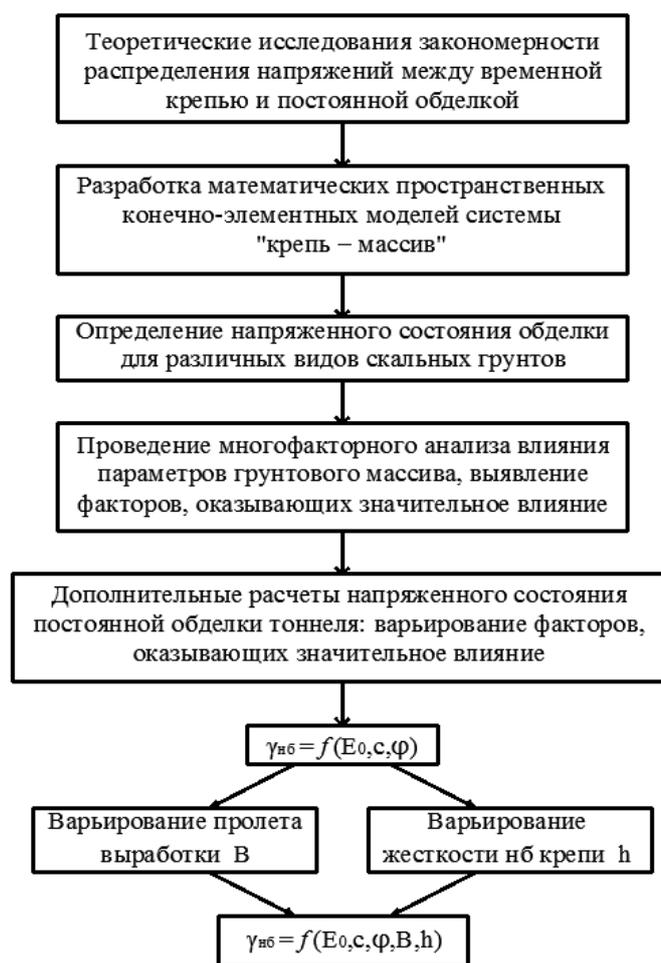


Рисунок 1 – Состав теоретических исследований

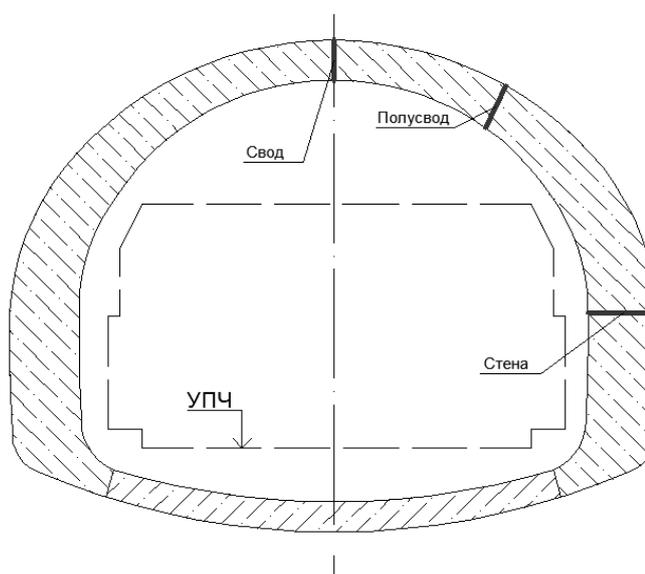


Рисунок 2 – Положение контрольных сечений

ниями, полученными по предложенным зависимостям учета временной набрызгбетонной крепи, с оценкой правомерности применения последних. Экспериментальные исследования выполнены на трех транспортных тоннелях. Напряженное состояние определялось методами тензометрии: при сооружении временной крепи и монолитной железобетонной обделки тоннеля в них устанавливались струнные деформометры (рисунок 3). Сечения, оснащенные деформометрами, располагались в различных инженерно-геологических условиях на 19 контрольных участках. По результатам исследований получены данные о развитии во времени нормальных тангенциальных напряжений в конструкции [6]. Для определения фактических физико-механических и деформационно-прочностных свойств горных пород проводились сейсморазведочные работы.

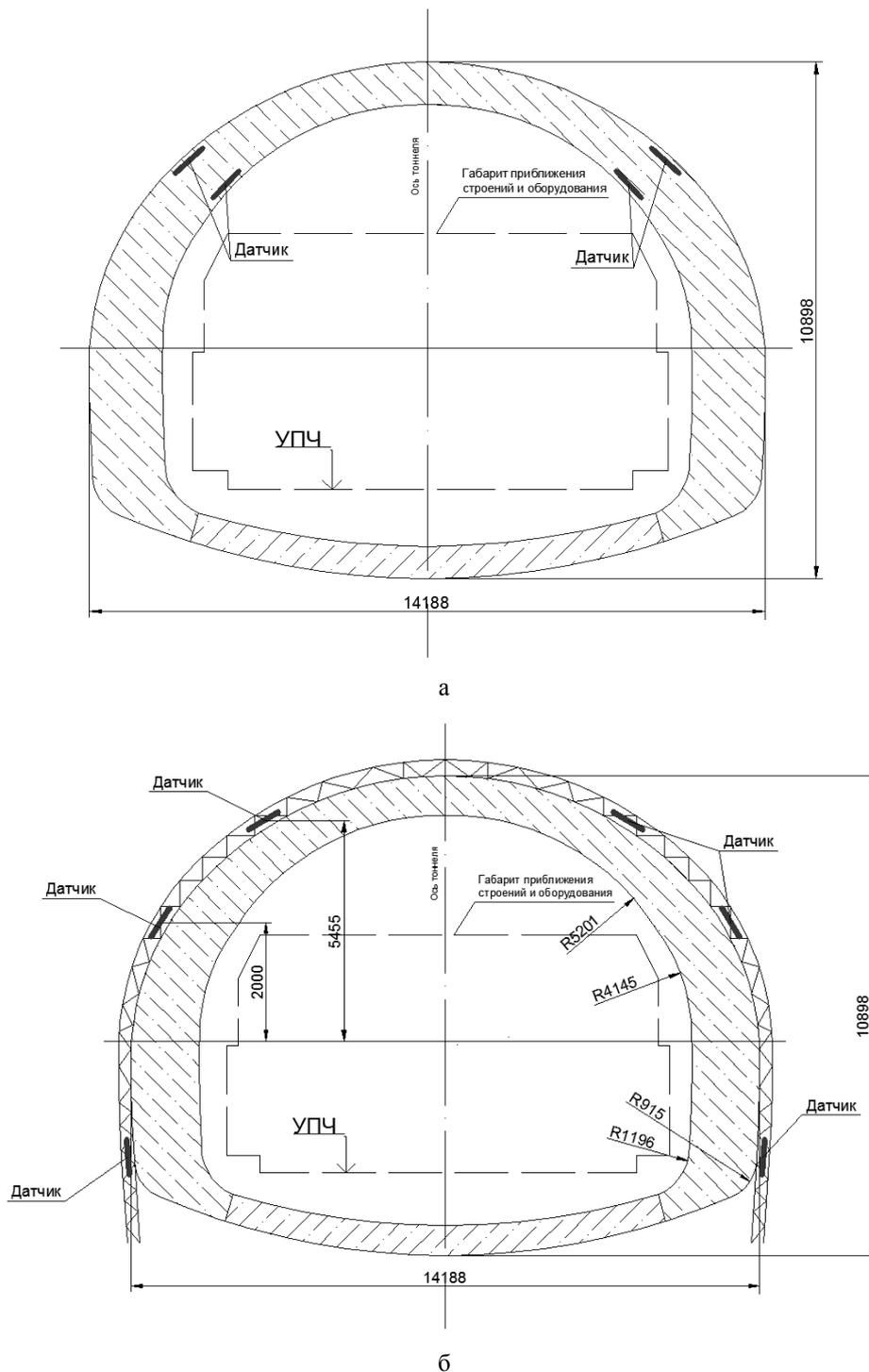


Рисунок 3 – Схема расположения датчиков в сечениях: постоянной обделки опытных участков № 7 – 13 (а); временной крепи опытного участка № 2 (б)

Определение расчетных напряжений в сечениях постоянных обделок опытных участков № 1, 7 – 13, 19 осуществлялось путем выполнения серий численных экспериментов на пространственных конечно-элементных моделях по методике, использованной при проведении теоретических исследований, описанных в работах [3 – 5]. В результате расчетов получены значения нормальных тангенциальных напряжений в сечениях постоянной обделки без учета влияния временной набрызгбетонной крепи. По данным исследования построены диаграммы, на которых показаны значения напряжений, фактически действующих в точках сечений постоянной обделки, в сравнении с расчетными данными и значениями, полученными по предложенным зависимостям учета временной набрызгбетонной крепи (рисунок 4).

На рисунке 5 представлены фактические значения коэффициента учета временной набрызгбетонной крепи в зависимости от модуля деформации грунтового массива в сравнении со значениями, полученными по предложенным эмпирическим зависимостям.

Статистический анализ данных по критерию Фишера ($F = 2,32 < F_{кр} = 2,69$) позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели регрессии, что свидетельствует о принципиальной возможности применения эмпирических зависимостей, полученных в ходе теоретических исследований, при расчете конструкций постоянных обделок тоннелей с учетом временной набрызгбетонной крепи.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования напряженного состояния системы «крепь – массив» позволили усовершенствовать существующую методику проектирования конструкций тоннельных обделок с учетом временной набрызгбетонной крепи.

Область применения методики – тоннели глубокого заложения с монолитной железобетонной обделкой, сооружение которых осуществляется горным способом в скальных грунтах, для которых справедлива гипотеза профессора М. М. Протодяконова.

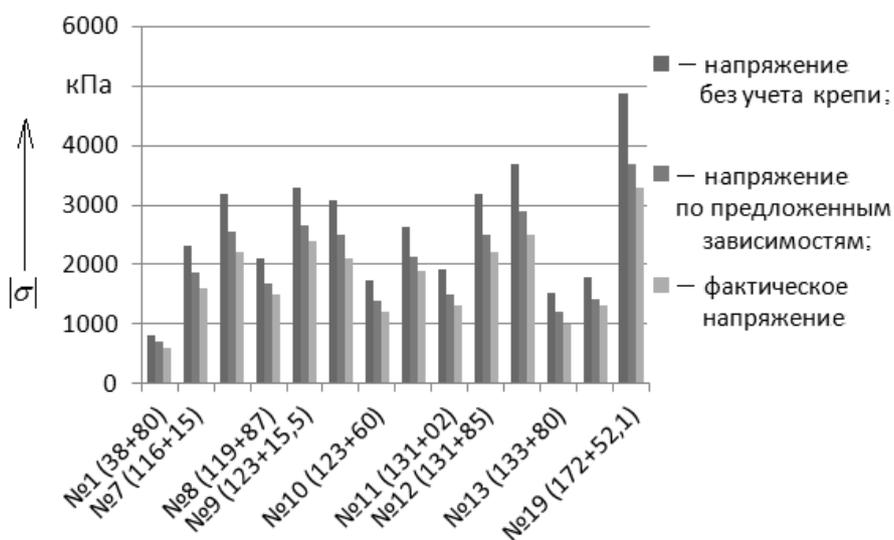


Рисунок 4 – Сравнение нормальных тангенциальных напряжений, действующих в сечениях постоянной обделки тоннеля на опытных участках № 1, 7 – 13, 19

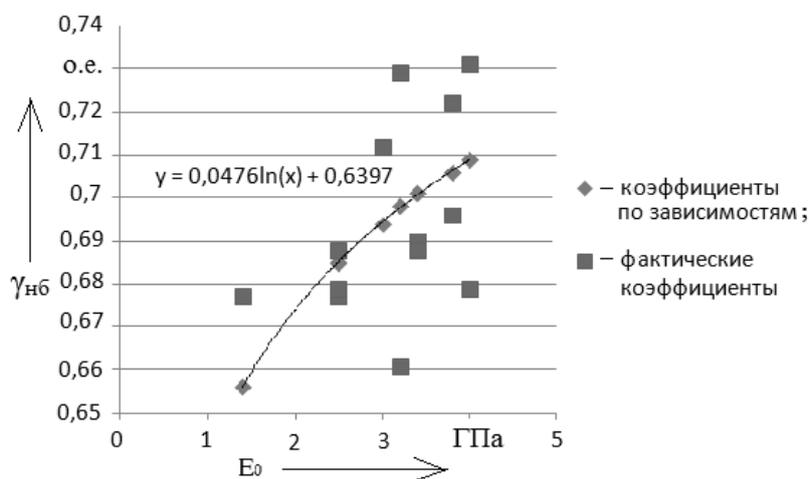


Рисунок 5 – Фактические значения коэффициента учета временной набрызгбетонной крепи в зависимости от модуля деформации грунтового массива в сравнении со значениями, полученными по эмпирическим зависимостям

В процессе исследования разработана программа *KOEF_NB*, позволяющая получать значения коэффициентов учета временной набрызгбетонной крепи для конкретных грунтовых условий и конструкций временной крепи. Изменение ожидаемого экономического эффекта от применения усовершенствованной методики проектирования в зависимости от модуля деформации грунтового массива для различных значений толщин временной набрызгбетонной крепи представлено на рисунке 6. Стоит отметить, что экономический эффект снижается в связи с тем, что при учете в составе постоянной конструкции временной набрызгбетонной крепи необходимо обеспечить однородность бетона последней, что может быть достигнуто добавлением фиброволокон и, следовательно, влечет за собой повышение стоимости строительства (участок № 2 на рисунке 6). Для каждого из графиков выделено три участка в зависимости от ожидаемого экономического эффекта:

- участок № 1 – положительный, изменяемый в пределах от 4 до 8 млн р. на 1 км;
- участок № 2 – требуется детальное рассмотрение;
- участок № 3 – отрицательный.

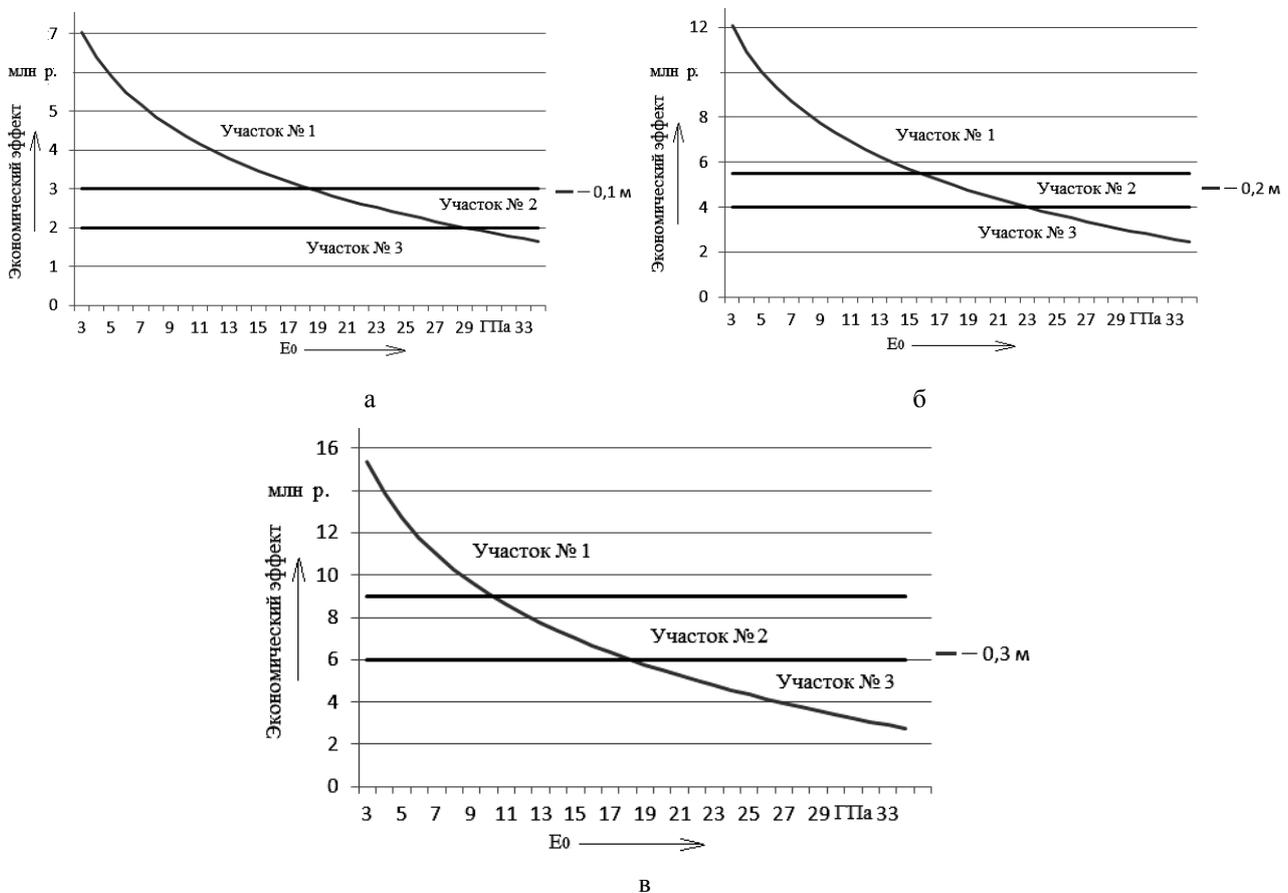


Рисунок 6 – Экономический эффект от применения предложенной методики (на 1 км тоннеля) при толщине временной набрызгбетонной крепи 0,1 (а), 0,2 (б), и 0,3 (в) м

Основные научные и практические результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований заключаются в следующем.

1. Впервые получены эмпирические зависимости, которые могут быть использованы для определения коэффициента $\gamma_{нб}$, с целью учета влияния временной набрызгбетонной крепи на напряжения, возникающие в постоянной обделке тоннеля, вызванные объемными силами тяжести, действующими в окружающем грунтовом массиве.

2. Статистический анализ экспериментальных данных по критерию Фишера позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели регрессии, что свидетельствует о принципиальной возможности применения эмпирических зависимостей, полученных в ходе исследований, при расчете конструкций постоянных обделок тоннелей с учетом временной набрызгбетонной крепи.

3. Разработана программа *KOEF_NB*, позволяющая получать значения коэффициентов учета временной набрызгбетонной крепи для конкретных грунтовых условий и конструкций временной крепи.

4. Усовершенствована методика проектирования, повышающая качество проектных решений для строительства транспортных тоннелей, учитывающая в составе постоянной конструкции временную набрызгбетонную крепь. Внедрение усовершенствованной методики в практику проектирования позволит значительно снизить материало- и трудоемкость строительства. Экономический эффект от применения предложенной методики должен составить до 8 млн р. на 1 км тоннеля.

Список литературы

1. Набрызгбетон для тоннелей [Текст] / В. С. Арутюнов, И. В. Гиренко и др. // Транспортное строительство / Всероссийский науч.-исследоват. ин-т. – М., 1986. – № 4. – С. 24 – 26.

2. Жуков, В. Н. Современные технологии набрызгбетонных работ в подземном строительстве [Текст] / В. Н. Жуков, Ш. Р. Магдиев // Метро и тоннели. – 2003. – № 4. – С. 20 – 23.

3. Цибариус, Ю. А. Учет временной набрызгбетонной крепи при определении напряженного состояния постоянной обделки тоннеля [Текст] / Ю. А. Цибариус // Вестник СибАДИ / Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск, 2013. – №4 (32). – С. 76 – 81.

4. Цибариус, Ю. А. Исследование влияния податливой временной набрызгбетонной крепи на напряженное состояние постоянной обделки тоннеля [Текст] / Ю. А. Цибариус // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3. – С. 125 – 133.

5. Цибариус, Ю. А. Напряженное состояние постоянной обделки тоннеля с учетом податливой временной набрызгбетонной крепи [Текст] / Ю. А. Цибариус // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Пермский национальный исследоват. политехн. ун-т. – Пермь, 2013. – Т. 3. – С. 440 – 448.

6. Цибариус, Ю. А. Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей распределения напряжений в конструкциях тоннельных обделок с учетом временной набрызгбетонной крепи [Текст] / Ю. А. Цибариус // Интернет-журнал «Науковедение» / Ин-т гос. управления, права и инновационных технологий. – М. – 2014. – № 1 (20). – С. 1 – 12.

УДК 656.073.7

Р. Р. Ахмедов

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОБОРОТА ПОРТОВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассматриваются особенности транспортной сети портов Балтийского моря, проблемы ее оптимизации с целью увеличения грузооборота и отражения вызовов, связанных с модернизацией транспортного комплекса России.

Порты Балтийского бассейна являются не только важнейшими экономическими объектами национальной экономики, они лидируют в суммарном грузообороте среди российских портов. По прогнозам они сохраняют лидерство по этому показателю и в перспективе, вплоть до 2030 г. Кроме того, отличительной особенностью портов Балтийского моря является их близость к наиболее развитым промышленным районам России, а также к странам Европы. Данные преференции позволяют им обрабатывать постоянно растущие потоки грузов различного наименования, превращая порты в уникальные транспортные узлы. В условиях мо-

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

дернизации транспортного комплекса актуальной задачей становится оптимизация грузооборота этих транспортных узлов с целью максимального расширения их функционала.

К тому же территориальная инфраструктура портов Балтийского моря позволяет наращивать их потенциал за счет более эффективного использования их железнодорожных сетей. Уточним, что территориальная инфраструктура Балтийского бассейна включает в себя порты восьми государств Европейского Союза: Дании (порт Копенгаген), Швеции (порт Стокгольм), Финляндии (порты Хельсинки, Турку), Эстонии (порт Таллин), Латвии (порты Рига, Лиепая, Вентспилс), Литвы (порт Клайпеда), Польши (порт Гданьск), Германии (порт Гамбург), а также шести российских портов: «Большой порт Санкт-Петербург», Приморск, Высок, Выборг, Усть-Луга и Калининград. Обработка этими портами в основном внешнеторговых грузов позволила им в 2011 г. переработать более 335 млн т грузов, из них 34,7 % – российскими портами.

Современный морской торговый порт – это крупное транспортное предприятие, на территории которого осуществляется передача грузов, следующих в международном и внутреннем сообщении с одного вида транспорта на другой. Среди множества показателей, характеризующих деятельность портов, на наш взгляд, можно выделить два основных – это их грузооборот и пропускная способность. Данные выборочного анализа динамики изменения грузооборота ряда крупных балтийских портов России и ближнего зарубежья за несколько лет доказывают наличие возможностей наращивания производственной мощности этих транспортных узлов и быстрого восстановления в посткризисный период (таблица 1).

Таблица 1 – Изменение грузооборота портов за период с 2007 по 2011 г., млн т/год

Порт (страна)	Год					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Клайпеда (Литва)	27,40	29,90	27,90	31,30	36,60	35,30
Прирост грузооборота, %	–	+ 9,1	– 6,7	+ 13,0	+ 17,0	– 3,6
Рига (Латвия)	25,93	29,56	29,72	30,48	34,07	36,05
Прирост грузооборота, %	–	+ 14,0	+ 0,6	+ 2,6	+ 11,8	+ 6,0
Санкт-Петербург (Россия)	59,60	59,90	50,40	58,00	60,00	57,80
Прирост грузооборота, %	–	+ 0,5	– 15,9	+ 15,1	+ 3,5	– 3,7
Таллин (Эстония)	36,00	29,00	31,60	36,65	36,46	29,50
Прирост грузооборота, %	–	– 19,5	+ 9,0	+ 16	– 0,5	– 19,1
Итого	148,93	148,36	139,62	156,43	167,13	158,65

Более наглядно выявленная динамика повышения представлена на рисунке.

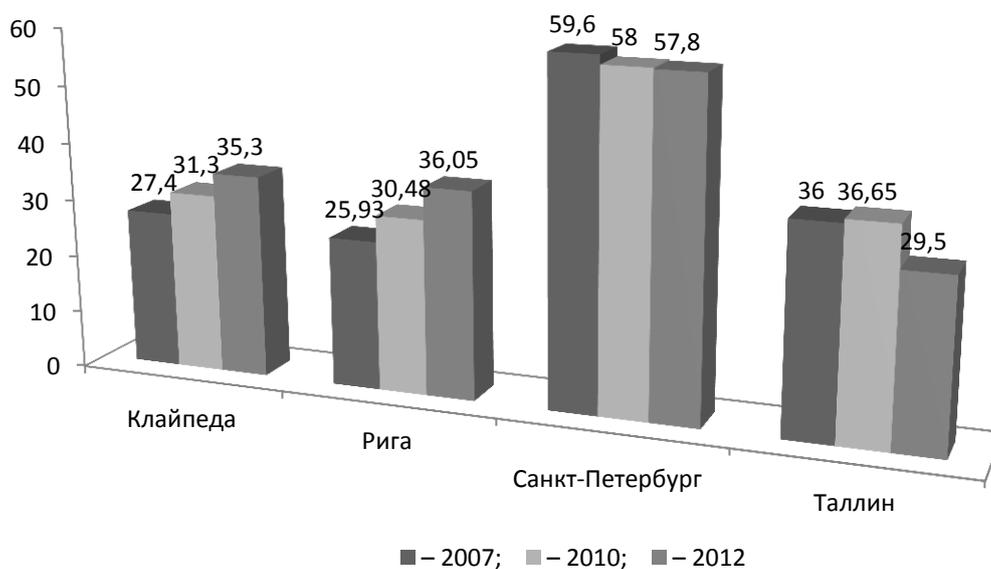


Диаграмма грузооборота портов в 2007, 2010 и 2012 годах

Одним из крупнейших портов Балтийского бассейна является «Большой порт Санкт-Петербург», грузооборот которого составляет почти 18 % от всего объема грузооборота портов Балтийского бассейна. Этот порт представляет собой сложный транспортный комплекс, включающий в свой состав такие пять портов, как Приморск, Усть-Луга, Выборг, Высоцк и непосредственно Санкт-Петербург. Главным конкурентом этого порта на Балтике выступает Клайпедский морской порт, являющийся самым северным незамерзающим портом на Восточном побережье Балтийского моря. Условия круглогодичной деятельности позволяют этому порту обеспечивать порядка 11% объема грузооборота всех портов Балтийского бассейна [1]. В отличие от «Большого порта Санкт-Петербург» и порта Таллин порты Клайпеда и Рига состоят из одного порта.

Объединение нескольких портов в один общий многофункциональный транспортный узел часто встречается в европейских, азиатских и американских государствах, и делается это с целью оптимизации грузопотоков и повышения эффективности использования имеющейся портовой инфраструктуры. Как правило, данная организационная форма чаще всего реализуется при необходимости территориального слияния расположенных рядом портов.

Мировая практика показывает, что перспективы развития порта для освоения растущих объемов работы требуют не только наличия соответствующих территорий, но и создания их резерва. Поэтому в последние годы при проектировании строительства или развития морских портов большое внимание уделяется поиску решений, обеспечивающих строительным затратам требуемый срок окупаемости, предполагающий соотнести выгоды за счет освоения грузооборота порта и размеры доходов от основной деятельности. Как правило, эти мероприятия связаны с необходимостью освоения растущего железнодорожного грузооборота за счет усиления пропускной способности соединительных портовых подъездных путей и улучшения условий производства маневровой работы в порту. Поэтому важным условием на стадии проектирования схемы железнодорожной сети порта является обеспечение доступа к информации о возможном изменении грузооборота и его величины.

Поскольку величина грузооборота порта зависит от многих взаимосвязанных факторов, имеющих сложно зависимый, а иногда и взаимоисключающий характер, исследователю необходимо установить наиболее приемлемый для прогнозирования уровень совпадения теоретических и эмпирических данных. Существенную помощь в этом оказывают методы и приемы математической статистики, дающие возможность использовать широкий круг функциональных зависимостей для прогнозирования расчетного показателя во времени. В частности, для описания изменения величины общего и железнодорожного грузооборотов порта можно использовать полином 3-й, 4-й или 5-й степени.

Циклическая полиномиальная функция представляет собой кривую, построенную на основе соответствующих систематических данных с использованием прикладного программного продукта Excel, в котором имеются подпрограммы расчета различных математических функций, в том числе полиномов, таким образом, целью подбора полиномиальных функций для описания соответствующего массива статистических данных является требуемый уровень совпадения теоретических и эмпирических знаний.

Должным образом спроектированная схема и путевое развитие железнодорожной сети порта с четко сформулированными и определенными по времени этапами развития являются исходным условием освоения наличного грузооборота порта. К примеру, нами приведены возможные варианты полиномов для рассматриваемых портов Балтийского моря (таблица 2). В таблице нами использовались следующие обозначения и допущения: R^2 – величина достоверности аппроксимации; значение R в квадрате; число от 0 до 1, которое отражает близость значений линии тренда к фактическим данным; линия тренда наиболее соответствует действительности, когда значение R в квадрате близко к 1 (оно также называется квадратом смешанной корреляции).

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Таблица 2 – Расчет полиномиальной функции

Наименование порта	Показатель	Степень					
		3-я		4-я		5-я	
Санкт-Петербург	Общий грузооборот	$y = 0,6963x^3 - 7,0397x^2 + 20,507x + 40,933$	$R^2 = 0,4915$	$y = -0,3625x^4 + 5,7713x^3 - 31,224x^2 + 65,457x + 14,833$	$R^2 = 0,6387$	$y = -0,6817x^5 + 11,567x^4 - 72,242x^3 + 203,38x^2 - 252,03x + 164,8$	$R^2 = 1$
	Железнодорожный грузооборот	$y = 0,6333x^3 - 6,9571x^2 + 23,724x + 25,9$	$R^2 = 0,6101$	$y = -0,5208x^4 + 7,925x^3 - 41,704x^2 + 88,307x - 11,6$	$R^2 = 0,8082$	$y = -0,615x^5 + 10,242x^4 - 62,458x^3 + 169,96x^2 - 198,13x + 123,7$	$R^2 = 1$
Таллин	Общий грузооборот	$y = -0,3579x^3 + 2157,7x^2 - 4E+06x + 3E+09$	$R^2 = 0,8441$	$y = -0,3977x^4 + 3194,8x^3 - 1E+07x^2 + 1E+10x - 6E+12$	$R^2 = 0,986$	$y = 0,1501x^5 - 1507,6x^4 + 6E+06x^3 - 1E+10x^2 + 1E+13x - 5E+15$	$R^2 = 1$
	Железнодорожный грузооборот	$y = -0,2653x^3 + 1599,5x^2 - 3E+06x + 2E+09$	$R^2 = 0,7413$	$y = -0,3898x^4 + 3131,3x^3 - 9E+06x^2 + 1E+10x - 6E+12$	$R^2 = 0,9449$	$y = 0,2432x^5 - 2443,2x^4 + 1E+07x^3 - 2E+10x^2 + 2E+13x - 8E+15$	$R^2 = 1$
Клайпеда	Общий грузооборот	$y = 0,5333x^3 - 4,0143x^2 + 9,8524x + 21,22$	$R^2 = 0,9529$	$y = -0,5583x^4 + 7,2333x^3 - 31,692x^2 + 55,317x - 2,9$	$R^2 = 1$	–	
	Железнодорожный грузооборот	$y = 0,35x^3 - 2,5857x^2 + 7,1643x + 12,76$	$R^2 = 0,9593$	$y = -0,55x^4 + 6,95x^3 - 29,85x^2 + 51,95x - 11$	$R^2 = 1$	–	
Рига	Общий грузооборот	$y = 0,3717x^3 - 1,93x^2 + 3,3483x + 27,77$	$R^2 = 1$	–		–	
	Железнодорожный грузооборот	$y = 1,5867x^3 - 11,285x^2 + 24,068x + 8,49$	$R^2 = 1$	–		–	

Следует отметить, что рассмотренные порты делятся на две группы: объединенные и одиночные порты. Анализ полиномиальных функций, представленных в таблице 2, позволяет заключить, что для прогнозирования изменений грузооборотов портов в пределах до пяти лет могут быть использованы: для одиночных портов – полином 3-й степени, для объединенных портов – полином 5-й степени. С нашей точки зрения, использование полиномиальных функций для прогнозирования результатов на более длительный период представляется нецелесообразным. Поэтому считаем, что полиномиальная функция может быть применена для корректировки данных долгосрочных прогнозов по периодам в три – пять лет при принятии окончательных проектных решений по этапу развития порта. Это обусловлено тем, что в период до двух лет, как показывает практика, разница в величине грузооборота может составлять от 0,5 до 2 млн т. Объясняется данное отклонение сложностью учета всех ситуаций, возникающих в ходе перераспределения грузопотоков между портами одного бассейна

при реализации экономических интересов грузовладельцев. Примером может служить порт Клайпеда, где из-за остановки одного из терминалов на полтора месяца в связи с проведением ремонтных работ годовой грузооборот порта уменьшился на 0,5 млн т.

Поскольку рассмотренные нами порты обслуживаются преимущественно железнодорожным транспортом, причем доля железнодорожного грузооборота составляет от 75 до 86 % от общего грузооборота, то снижение доли участия железнодорожного грузооборота в обслуживании порта в отдельных случаях может привести к потере конкурентоспособности данного вида перевозок по сравнению с автомобильным и трубопроводным видами транспорта. За перевозку конкретных видов грузов в адрес морского порта между ними идет жесткая конкуренция. Об этом в своей работе упоминает председатель Комитета по транспорту и транзиту Международного конгресса промышленников и предпринимателей Л. Н. Козлов: «Каждый из видов транспорта развивает свои корпоративные информационные системы, направленные исключительно на решение внутренних задач, а не на интеграцию с информационными системами смежных видов транспорта. Стихийное развитие локальных и корпоративных систем формирует среду, в которой интеграция в международную интеллектуальную транспортную систему, в частности в сеть международных транспортных коридоров, может оказаться технически невозможной» [2, с. 128].

Таким образом, анализ данных общего и железнодорожного грузооборотов портов Балтийского бассейна за исследуемый период показал, что в большинстве случаев порты обладают необходимым резервом пропускной способности морских грузовых фронтов, но имеют недостатки схемных решений в железнодорожной сети. Это напрямую отражается на темпе изменения железнодорожного грузооборота в условиях подъема и спада общего грузооборота порта. В целом изменение железнодорожного и общего грузооборота происходит синхронно и с одинаковой интенсивностью. Выявленные случаи расхождения темпов изменений обусловлены несоответствием пропускных способностей портовой инфраструктуры и железнодорожной сети порта.

Учитывая имеющиеся тенденции увеличения грузопотоков в смешанном железнодорожно-водном сообщении, можно утверждать, что грузооборот существующих портов в ближайшее десятилетие будет возрастать. Поддерживать данный тренд можно лишь при условии сохранения железнодорожного транспорта в качестве основного партнера порта. Акцент на этом усилен в Транспортной стратегии России на период до 2030 года, где в качестве одной из главных задач развития транспортной сети обозначена необходимость обеспечения такого уровня ее инфраструктуры, чтобы добиться ускорения товарообмена, вызывающего развитие экономики и сохраняющего равную доступность транспортной сети для всех жителей России [3]. Несмотря на трудность реализации данной задачи считаем, что для ее достижения, а также для осуществления оптимизации грузооборота портов Балтийского моря в условиях модернизации транспортного комплекса научному и предпринимательскому сообществу необходимо уделять постоянное внимание совершенствованию методики построения и развития железнодорожной сети порта, так как обширность российской территории позволяет активно развивать транзитную доставку грузов и в перспективе достигнуть уровня международного сервиса.

Список литературы

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [Текст] / М., 2013. – 180 с.
2. Козлов, Л. Н. О приоритетах в формировании и развитии международных транспортных коридоров [Текст] / Л. Н. Козлов // Евразийская экономическая интеграция. – М., 2009. – № 4 (5). – С. 121 – 134.
3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года [Текст] / М., 2008. – 171 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИЗАВОДСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассматривается проблема обеспечения точности позиционирования транспортирующих машин (железнодорожных кранов, мотовозов, электровозов и др.), перемещающихся по рельсовому пути на внутризаводском промышленном транспорте.

Для улучшения точности системы автоматизированного позиционирования, ориентированной на применение на внутризаводском рельсовом железнодорожном транспорте, предложено техническое решение, защищенное патентом РФ.

Известно, что наряду со специальными системами управления, решающими некоторую узкую задачу, но используемыми в транспортирующих машинах самых разных типов, существуют и системы управления узкоспециализированными транспортирующими машинами, предназначенные для почти однотипных машин. К таким системам могут быть отнесены, например, системы управления позиционированием внутризаводского рельсового железнодорожного транспорта. Подобный транспорт, имеющий, как правило, унифицированную ходовую часть, представлен весьма ограниченным типом: железнодорожными кранами сравнительно малой грузоподъемности, мотовозами, маневровыми электровозами. Эксплуатируются эти машины чаще всего совместно с общезаводскими и цеховыми складами, куда они доставляют штучные или размещенные в таре грузы и забирают их оттуда.

Для осуществления требуемого манипулирования грузами указанные выше транспортирующие машины необходимо останавливать в тех или иных точках (позициях) рельсового пути с достаточно высокой точностью, что и обеспечивается с помощью специальных систем управления позиционированием.

Обычно внутризаводским транспортом управляют машинисты, которые ведут наблюдение за тем, нет ли на пути движения машины объектов, создающих опасную ситуацию, определяют момент достижения машиной нужной позиции остановки, подают приводу машины команду на торможение и остановку. Для обеспечения точности определения момента достижения машиной нужной позиции используют специальные устройства, которые выдают машинисту информацию о текущем положении или перемещении машины. Системы управления позиционированием образуются этими устройствами в сочетании с самим машинистом и элементами исполнения подаваемой им команды «стоп». Поскольку в такой системе оказывается задействованным человек, она получается не автоматической, а автоматизированной, однако именно это обеспечивает ее безопасность и надежность. Тем не менее существующие системы позиционирования рельсового транспорта, подобные описанной, не лишены недостатков, и главный из них – невысокая точность отсчета перемещений транспортирующей машины.

В настоящее время устройства, выдающие машинисту информацию о положении или перемещении машины, выполняются по разным принципам. Первый из них (рисунок 1, а) заключается в установке на рельсе релейного индуктивного датчика.

С помощью кронштейна 1 сбоку рельса закрепляется коробка 2 с блоком питания и передачи сигнала от индуктивного датчика 3. Последний располагается так, чтобы некоторое колесо 4 транспортирующей машины при ее движении по рельсу 5 своей ребордой могло входить в магнитное поле датчика. Кронштейн 1 может быть размещен в различных местах рельса. Для этого он снабжен крепежными элементами: прижимом 6, парой «винт – гайка» 7 и направляющей пружиной 8. Ослабив крепежные элементы, кронштейн 1 вместе с коробкой

2 и датчиком 3 устанавливают в требуемой позиции остановки машины. После этого крепежные элементы затягивают. Когда при перемещении машины реборда ее колеса оказывается над датчиком, он выдает сигнал на индикаторное табло (на рисунке 1, а не показано), и машинист, видя это, подает на привод машины и ее тормоза команду «стоп».

Совершенно ясно, что точность позиционирования машины с описанным устройством весьма мала, поскольку зона взаимодействия колеса и датчика имеет существенные нестабильные размеры. Кроме того, применение данного устройства чрезвычайно неудобно из-за того, что при изменении требуемой позиции остановки машины кронштейн с датчиком необходимо переустанавливать.

Более удобны в эксплуатации и имеют более высокую точность устройства, показанные на рисунке 1, б, в. Их действие основывается на использовании свойств щебня 9, заполняющего промежутки между шпалами рельсового пути, применения импульсного энкодера 10, соединенного с роликом, опирающегося на рельс 11, или вертикально направленного между рельсами лазерного дальномера 12.

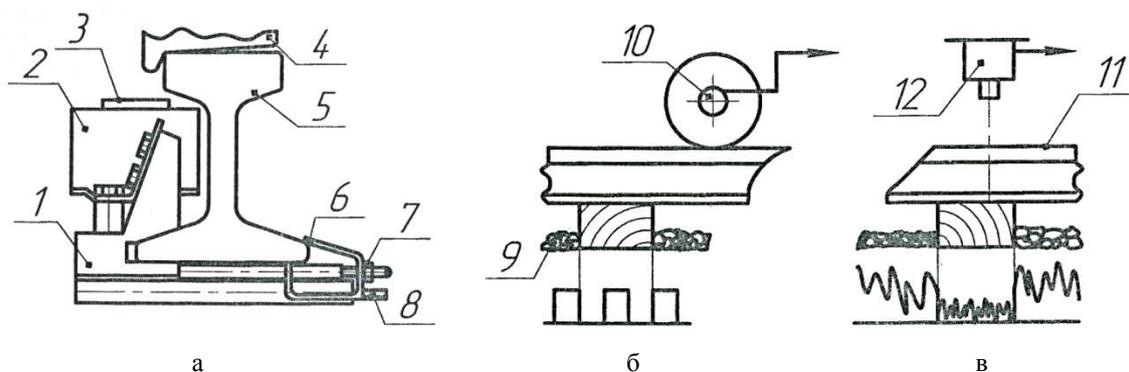


Рисунок 1 – Существующие устройства определения положения и отсчета перемещений машины:
а – с индуктивным датчиком; б – с импульсным энкодером; в – с лазерным дальномером

Ролик закрепляется на днище машины через пружину, поднимающую его к рельсу, а дальномер – там же, но жестко. При движении машины энкодер выдает прямоугольные импульсы, а дальномер – импульсы произвольной формы, но разные по среднему уровню в зависимости от того, со шпалой или щебнем взаимодействует луч дальномера [1]. Если выход энкодера напрямую, а выход дальномера через формирователь импульсов соединить со счетчиком импульсов с цифровым табло, то машинист сможет определять текущее положение машины и при достижении ею требуемой позиции или с некоторым упреждением подавать на ее привод команду «стоп».

Преимущества систем позиционирования с энкодером и систем с дальномером очевидны. Однако первые зачастую работают с большими накопленными погрешностями, вызванными проскальзыванием и износом ролика, а вторые не всегда обеспечивают требуемую точность позиционирования из-за низкой дискретности, равной расстоянию между осями шпал. Накопленные погрешности в первых системах принципиально неустраняемы. Что касается дискретности систем с дальномером, то ее вполне возможно повысить. Реализуя эту возможность, для повышения дискретности устройства отсчета перемещений, построенного на базе дальномера, и увеличения точности системы автоматизированного позиционирования, ориентированной на применение на внутривозовском рельсовом железнодорожном транспорте, авторы статьи предложили техническое решение, описываемое ниже и защищенное патентом РФ № 128316 [2].

Предложенное решение базируется на применении дублирующего дальномера, устанавливаемого относительно основного дальномера на расстоянии, равном промежутку между шпалами в направлении движения транспортирующей машины. Указанный промежуток при

прокладке внутризаводских рельсовых путей выполняется, как правило, вдвое шире шпалы. Это обусловлено тем, что в отличие от магистральных путей с шириной колеи 1520 мм, где обычно используются рельсы типа Р50 или Р65, шпалы шириной $M = 250$ мм и количество шпал N на рельсовое звено принимается равным 40, 46 или 50, при строительстве путей на промышленных предприятиях используют рельсы уменьшенного размера типа Р43, шпалы шириной $M = 230$ мм, а количество шпал N на звено длиной $L = 25$ м принимают равным 36 [3]. Согласно утверждению в работе [4] ширина промежутка между шпалами

$$A = [(L - B)/(N - 1)] - M, \quad (1)$$

где B – расстояние между стыковыми шпалами.

Поскольку B обычно равно 0,4 м, для промышленных предприятий ширина промежутка между шпалами

$$A = [(25 - 0,4)/35] - 0,23 \approx 0,47 \text{ м.}$$

Величина A оказывается практически равной $2M$, что и позволяет без особых технических затруднений осуществить предложение.

Схема устройства отсчета перемещений по патенту РФ № 128316 «Путевая машина» показана на рисунке 2. Входные элементы устройства предназначены для бесконтактного измерения дистанции по вертикали между транспортирующей машиной и путем, монтируются на днище машины 1 между рельсами 2 и представляют собой первый 4 и второй 5 лазерные дальномеры со считывающими головками 6 и 7.

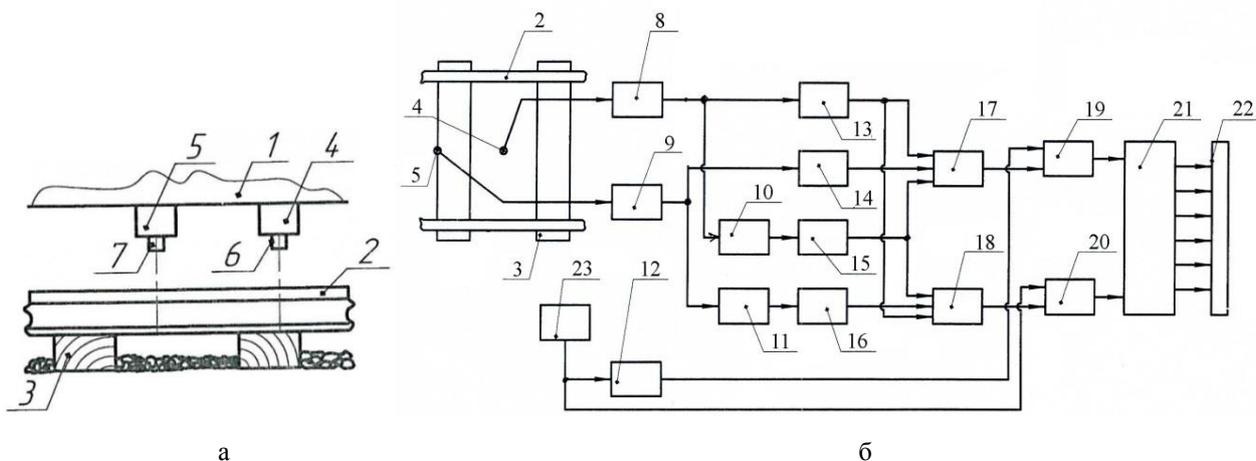


Рисунок 2 – Устройство отсчета перемещений по патенту РФ № 128316:
а – схема расположения лазерных дальномеров; б – логическая схема устройства

Устройство снабжено первым 8 и вторым 9 формирователями импульсов, первым 10, вторым 11 и третьим 12 логическими элементами «НЕ», первой 13, второй 14, третьей 15 и четвертой 16 дифференцирующими цепями, первым 17 и вторым 18 логическими элементами «ИЛИ», первым 19 и вторым 20 логическими элементами «И», реверсивным счетчиком импульсов 21, цифровым индикатором 22 и указателем направления движения машины 23.

При движении машины вдоль рельсового пути будет происходить следующее (рисунок 3). Считывающее устройство 6 или 7, взаимодействуя со шпалами 3, будет выдавать сигналы низкого уровня, а взаимодействуя с разделяющими шпалами участками со щебнем, – сигналы относительно высокого уровня (рисунок 3).

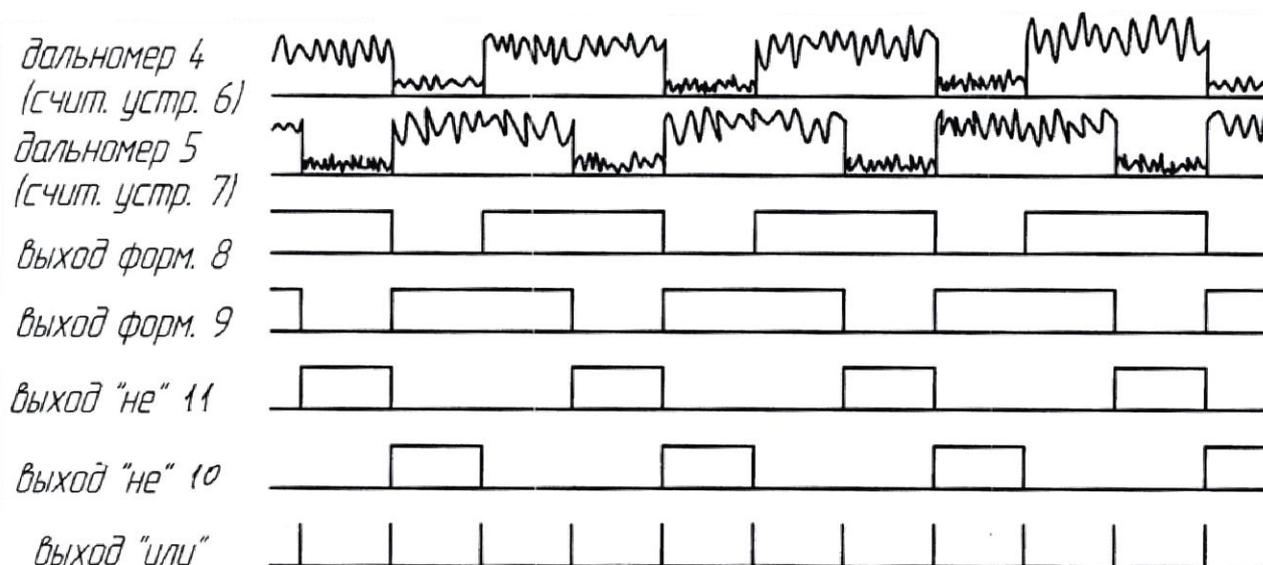


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы устройства по патенту РФ № 128316

Проходя через формирователи импульсов 8 и 9, эти сигналы приобретут прямоугольную форму. Далее они поступят на дифференцирующие цепи 13 и 14 и на элементы «НЕ» 10 и 11. Последними они будут инвертированы, но прямоугольную форму сохранят. С выходов элементов «НЕ» инвертированные импульсы поступят на дифференцирующие цепи 15 и 16. Дифференцирующие цепи 13 – 16 «вырезают» из поступивших на них импульсов передние фронты и пропускают их дальше.

Если машина 1 движется по рельсам 2 «вперед» («вправо»), то передними фронтами импульсов, поступающих на дифференцирующие цепи, являются левые фронты. Если машина движется «назад» («влево»), то передними окажутся правые фронты. Пропуская «вырезанные» импульсы с выходов дифференцирующих цепей 13 – 15 на входы элемента «ИЛИ» 17, получим на выходе этого элемента непрерывную последовательность импульсов, соответствующую движению машины «вперед». Аналогично, пропуская «вырезанные» импульсы с выходов дифференцирующих цепей 14 – 16 на входы элемента «ИЛИ» 18, получим на выходе этого элемента непрерывную последовательность импульсов, соответствующую движению машины «назад», Интервал импульсов в том и другом случае будет примерно соответствовать ширине шпалы.

В зависимости от того, «вперед» или «назад» движется машина, указатель 23 направления движения машины (он связан с приводом машины общеизвестным образом) выдает сигнал «0» или «1» («0» – «вперед», «1» – «назад»). Поэтому при движении машины «вперед» на второй вход элемента «И» 19 поступит «1» (это «0», инвертированный элементом «НЕ» 12). На первый вход элемента «И» 19 при движении машины «вперед» будут поступать импульсы с выхода элемента «ИЛИ» 17. В результате эти импульсы будут проходить через элемент «И» 19 и поступать на суммирующий вход реверсивного счетчика 21. При движении машины «назад» сигнал «1» от указателя 23 направления движения машины будет подан на второй вход элемента «И» 20. На первый вход элемента будут поступать импульсы с выхода элемента «ИЛИ» 18. Эти импульсы будут проходить через элемент «И» 20 и поступать на вычитающий вход реверсивного счетчика 21. Получается, что при движении машины «вперед» на выходах счетчика 21 будут появляться двоичные числа с дискретностью примерно в одну шпалу, характеризующие расстояние, пройденное машиной «вперед». Если же машина теперь начнет двигаться «назад», то числа на выходе счетчика 21 начнут, соответственно, уменьшаться. Числа с выхода счетчика поступают далее на выходы устройства цифровой индикации 22. В результате индикатор будет показывать машинисту и путь, пройденный

машиной, и ее текущее положение с момента начала движения. Учитывая то, что период следования импульсов, поступающих на счетчик, примерно равен ширине одной шпалы, можно полагать, что именно ширина одной шпалы определяет погрешность отсчета перемещений и расстояний, пройденных предлагаемой машиной. Принято считать, что при известном периоде следования импульсов в измерительной последовательности импульсов, погрешность измерения равна половине периода следования импульсов. Таким образом погрешность определения расстояний, пройденных транспортирующей машиной при ее движении, будет равна примерно половине ширины шпалы (второе меньше, чем у устройства, описываемого в источнике [1]). Причем эта величина не зависит от пройденного машиной расстояния.

На базе рассмотренного устройства разработана автоматизированная система позиционирования широко используемого в промышленности мотовоза МПТ-4. Манипулятор мотовоза, установленный на крыше кабины и дистанционно управляемый из нее, при этом был заменен манипулятором SD-251-51 с аналогичными техническими характеристиками [5], но устанавливаемым на платформе сзади кабины. Там же был размещен и пульт управления манипулятором. Это повысило удобство работы машиниста мотовоза при выполнении им погрузочно-разгрузочных операций с помощью манипулятора и освободило место в кабине для аппаратуры устройства отсчета перемещений, в частности, блока цифровой индикации. Устройства управления приводом и тормозами мотовоза изменениям не подвергались. Для установки же дальномеров под кабиной были расположены кронштейны. На них болтами были закреплены два лазерных дальномера LDM41, имеющие диапазон измерения 0,1 – 30 м и точность ± 2 мм. Их потребляемая мощность – 1,5 Вт, напряжение питания – 10 – 30 В. Входной сигнал токовый – от 4 до 20 мА.

Разработанная система позиционирования и модернизированный с ее применением мотовоз могут существенно повысить производительность транспортно-складских систем промышленных предприятий (становится ненужным реверсивное движение мотовоза при позиционировании, к которому в настоящее время часто приходится прибегать для обеспечения точной остановки). Поскольку точность позиционирования улучшается, появляется возможность уменьшить коэффициенты запаса по габаритным размерам складов, совместно с которыми работает мотовоз. Экономически применение описанной системы, по-видимому, также целесообразно, так как она может быть построена на типовых микросхемах и себестоимость ее невелика.

Список литературы

1. Пат. 2228988 Российская Федерация, МПК E 01 B 35/06, G 01 C 3/00. Машина и способ для определения положения шпал рельсового пути [Текст] / Й. Тойрер, Б. Лихтбергер (Австрия). – № 2002121059; Заявлено 08.08.2002; Опубл. 20.05. 2004. Бюл. № 5.
2. Пат. 128316 Российская Федерация, МПК G 01 C 3/00. Устройство для определения расстояний, пройденных машиной по железнодорожному пути [Текст] / Я. Л. Либерман, Л. Н. Горбунова (Россия). – № 2012153511; Заявлено 11.12.2012; Опубл. 20.05. 2013. Бюл. № 14.
3. СНИП 2.05.07–91*. Промышленный транспорт. Железнодорожный транспорт шириной колеи 1520 мм [Текст]. М., 1996. – Гл. 3. – 120 с.
4. Виноградов, В. В. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие [Текст] / В. В. Виноградов, А. М. Никонов, Т. Г. Яковлева. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с.
5. Гурин, М. А. Проектирование ручных манипуляторов: Учебное пособие [Текст] / М. А. Гурин / Уральский политехн. ин-т. – Свердловск, 1986. – 112 с.

УДК 656.259.12:621.372.5: 517.54

С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ КООРДИНАТЫ ПОДВИЖНОЙ ЕДИНИЦЫ НА ПУТИ

В статье рассматриваются вопросы определения координаты подвижного состава на участке железнодорожного пути. Предложено и обосновано применение математического аппарата конформных отображений.

Стратегия развития ОАО «РЖД» на перспективу до 2030 года предусматривает модернизацию инфраструктуры железнодорожного транспорта, в том числе устройств автоматики и телемеханики, для обеспечения повышения скоростей движения поездов в грузовом и пассажирском сообщении. Вопросы обеспечения безопасности движения поездов, основу которых составляют системы и устройства автоматики и телемеханики, всегда были в центре внимания, особенно при скоростном движении. Точное и надежное определение местоположения поездов дает возможность обеспечить безопасность их движения. Для реализации этой задачи наибольшее распространение получили рельсовые цепи (РЦ), которые имеют следующие преимущества перед другими аналогичными устройствами:

- минимальная вероятность ложной свободности контролируемого участка пути;
- контроль целостности рельсовых нитей;
- передача сигнала автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) на локомотив.

Однако на современном этапе развития средств автоматики и телемеханики все чаще РЦ заменяют или дополняют различными устройствами с целью снижения дискретности при определении местоположения поездов, так как при высокой скорости движения необходимо иметь более подробную информацию о движении поезда: точные координаты головы и хвоста поезда, реальную скорость движения. Большинство существующих систем автоматики дают информацию только о номере занятой рельсовой цепи. Например, при пересечении границы блок-участка поездом, длина которого не превышает длины одной РЦ, он занимает две РЦ, что существенно снижает пропускную способность железных дорог.

В настоящее время определение координаты нахождения подвижной единицы нашло широкое применение на участках подгорочных путей сортировочных горок с помощью напольных технических средств: точечных путевых датчиков, рельсовых цепей, индуктивно-проводных датчиков, устройств импульсного зондирования. Наличие недостатков этих технических средств, а также трудностей, связанных с их эксплуатацией, привели к необходимости поиска альтернативных решений.

Авторами предлагается методика определения координаты подвижной единицы, основанная на использовании математического аппарата конформных отображений, применяемого для анализа изменения параметров рельсовой линии. Данный математический аппарат позволяет в режиме реального времени определять области входных сопротивлений рельсовой линии, что дает возможность по изменению входного сопротивления определять координату подвижной единицы на пути с высокой точностью [1].

Пусть несущая частота сигнального тока равна 420 Гц, длина рельсовой линии – 625 м, сопротивление изоляции рельсовой линии изменяется от 0,5 до 5 Ом/км. Согласно утверждению в статье [2], правая полуплоскость $\text{Re}Z \geq 0$ при конформном отображении перейдет на окружность с центром в точке, координаты которой рассчитываются по формуле (1), и радиусом, рассчитываемым по формуле (2). Построение областей нормальных состояний четырехполюсника рельсовой линии для различных значений сопротивления изоляции представлено на рисунке 1. Областью нормального состояния рельсовой линии будем назы-

вать область входных сопротивлений, рассчитанных для свободной и исправной рельсовой линии:

$$W = \frac{2\alpha\bar{A}\bar{C} + AD\bar{\lambda} + BC\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\operatorname{Re}(CD\bar{\lambda})}; \quad (1)$$

$$R = \left| \frac{(AD - BC)\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\operatorname{Re}(CD\bar{\lambda})} \right|. \quad (2)$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии;
 $\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{\lambda}$ – сопряженные комплексные величины;
 λ, α – коэффициенты уравнения прямой.

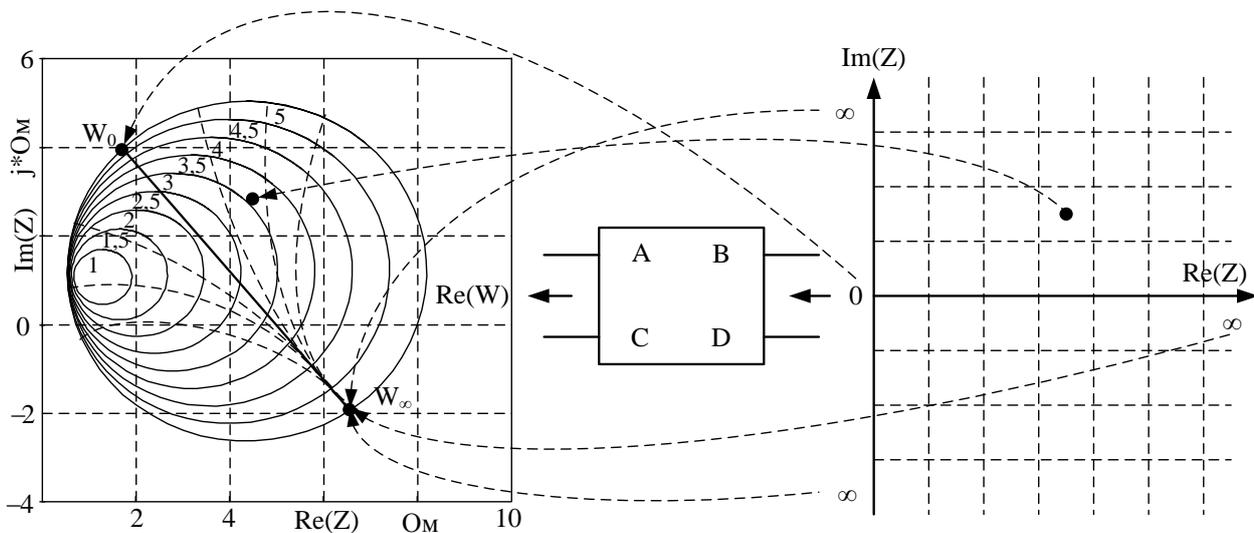


Рисунок 1 – Пример конформного преобразования на комплексной плоскости при сопротивлении изоляции рельсовой линии от 1 до 5 Ом·км

В качестве нагрузки рельсового четырехполюсника рассматривается область всевозможных значений с неотрицательной действительной частью комплексных сопротивлений, представляющая правую полуплоскость комплексной плоскости. В результате конформного преобразования правой полуплоскости получаем множество значений входного сопротивления, имеющих форму окружности, лежащей в правой полуплоскости. Размер и место нахождения области полностью зависят от параметров четырехполюсника рельсовой линии [3].

Проведем анализ областей входного сопротивления рельсовой линии при наложении одиночного шунта $R_{ш}$ в различных ее точках. Поперечное сопротивление будем вносить через каждые 12,5 м.

Коэффициенты четырехполюсника $A_{ш}, B_{ш}, C_{ш}$ и $D_{ш}$ рельсовой линии в таком режиме вычисляются по формуле (3):

$$\begin{pmatrix} A_{ш} & B_{ш} \\ C_{ш} & D_{ш} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\gamma l_2 & Z_b \cdot sh\gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh\gamma l_2 & ch\gamma l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{ш}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ch\gamma l_1 & Z_b \cdot sh\gamma l_1 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh\gamma l_1 & ch\gamma l_1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта (поперечное сопротивление);

l_1, l_2 – координаты наложения шунта от конца и от начала рельсовой линии соответственно.

На рисунке 2 показано построение областей нормального состояния рельсовой линии и перемещение областей в зависимости от места положения шунта номиналом 0,06 и 0,25 Ом с

интервалом 12,5 м, при сопротивлении изоляции рельсовой линии 2,5 Ом/км. Центры отображаемых областей обозначены крестиками.

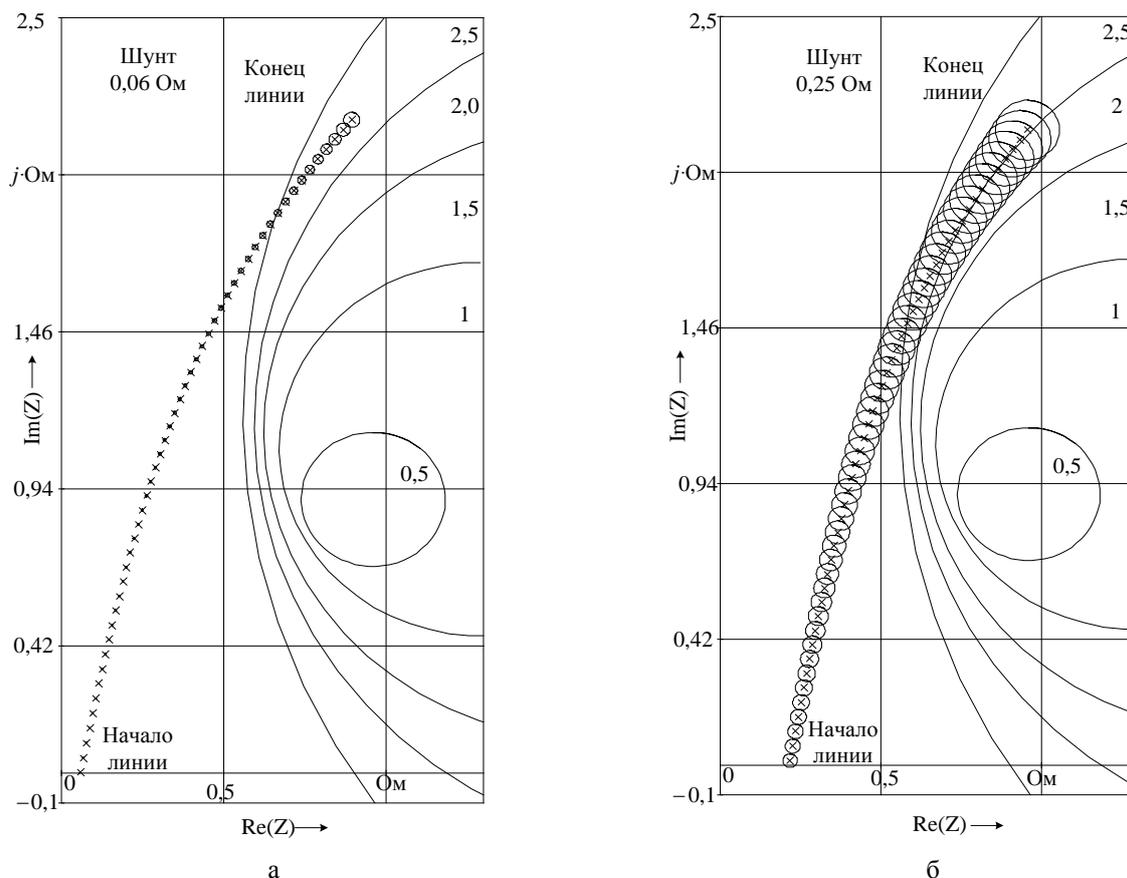


Рисунок 2 – Конформное отображение областей входного сопротивления рельсовой линии при внесении поперечного сопротивления номиналом 0,06 (а) и 0,25 (б) Ом

Проанализируем полученные результаты.

1. Чем меньше вносимое сопротивление шунта, тем выше точность определения координаты его наложения за счет отсутствия пересечений областей входных сопротивлений.
2. Чем больше расстояние от начала рельсовой линии до места наложения шунта, тем больше область возможных значений входных сопротивлений рельсовой линии.
3. Для областей, имеющих общие пересечения, при различных номиналах сопротивления шунта (0,06 и 0,25 Ом) по принадлежности точки к нескольким областям нельзя однозначно определить место его наложения.

Таким образом, точность определения координаты шунта по полученным результатам измерений входного комплексного сопротивления рельсовой линии будет зависеть от размеров области входного сопротивления, от выбранного шага дискретизации при ее расчете, а также от номинала сопротивления вносимого шунта. Определение координаты положения шунта за счет вычисления координат центров данных областей (см. формулу (1)) и привязки к этим точкам результатов измерений невозможно, поскольку эти точки всего лишь абстрактные значения входных сопротивлений для конкретных неизвестных значений нагрузки рельсового четырехполюсника.

Введем правила определения координаты наложения шунта:

каждое значение входного сопротивления рельсового четырехполюсника однозначно принадлежит только одной области, которая соответствует определенной координате наложения шунта;

первая расчетная область рассчитывается для координаты шунта 1 м;

дискретность расчета и выборки полученных результатов принимается равной 1 м;

две расчетных смежных области, соответствующие определенным координатам, имеют только одну общую точку пересечения. Если такой точки не существует при данной дискретизации расчетов, то выбирается ближайшая смежная область, соответствующая требованиям $|W_i - W_k| - |R_i + R_k| \rightarrow \min$ (в идеальном случае расстояние между центрами смежных областей равно сумме их радиусов), где W_i, W_k – координаты центров i -й и k -й областей соответственно, R_i, R_k – радиусы i -й и k -й областей;

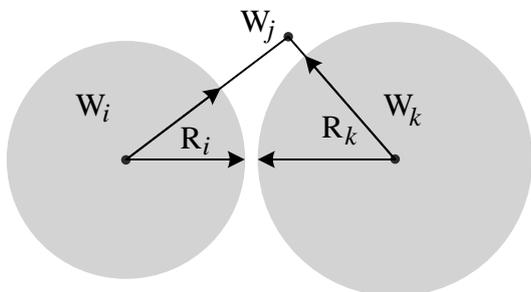


Рисунок 3 – Определение принадлежности точки для непересекающихся областей

для измеренных значений входного сопротивления (W_j), которые по результатам моделирования не принадлежат смежным расчетным областям (рисунок 3), принадлежность к области, соответствующей конкретной координате положения шунта, определяется по следующему правилу: W_j принадлежит i -й области, если выполняется неравенство $|W_i - W_j| - R_i \leq |W_k - W_j| - R_k$, в противном случае полученное значение принадлежит k -й области.

Соблюдение перечисленных выше правил позволяет определить координаты положения шунта с определенной дискретностью, зависящей от шага дискретизации и номинала вносимого шунта. Определим точность вычисления координаты наложения шунта на рельсовой линии при значениях сопротивления шунта от 0,06 до 0,25 Ом (рисунок 4).

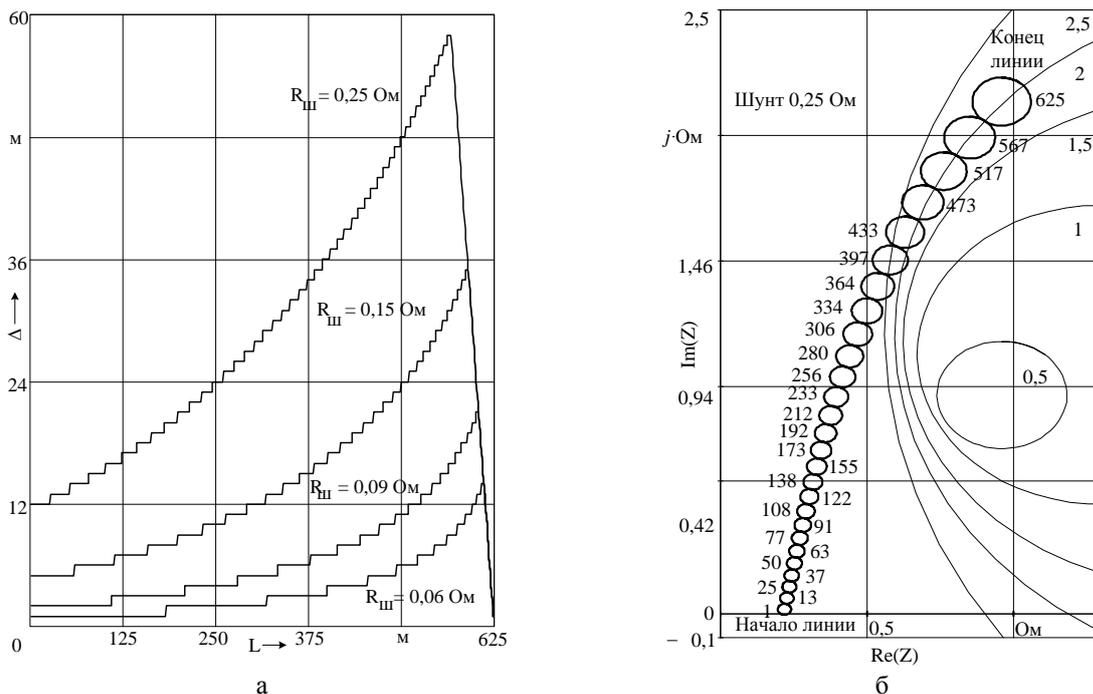


Рисунок 4 – Абсолютная погрешность определения координаты места положения шунта (а) и определение координаты места наложения шунта для пересекающихся областей в одной точке (б) на рельсовой линии

Как видно из рисунка 4, при длине рельсовой линии 625 м в широком диапазоне изменения сопротивления шунта погрешность определения координаты его наложения не превышает 60 м. При этом следует учесть, что в реальных условиях результирующее сопротивление колесных пар вагона, и тем более поезда, существенно меньше значения 0,06 Ом (нормативного шунта).

Увеличение точности определения или ухудшение шунтовой чувствительности может привести к появлению случая пересечения нескольких областей, при котором полученное значение входного сопротивления будет принадлежать сразу нескольким областям, соот-

ветствующим разным координатам шунта, что показано на рисунке 2, б. Таким образом, недостатком данной методики определения координаты наложения шунта является дискретность определения координаты, при этом погрешность может достигать более 10 % длины рельсовой линии, что не дает полной и непрерывной картины изменения состояния рельсовой линии. С целью устранения данного недостатка необходимо рассмотреть характерные точки внутри полученных областей (см. рисунок 4).

Кроме точки центра области входного сопротивления рельсовой линии при конформном отображении существует еще две однозначно определяемые точки, характерные для каждой области, по которым можно уточнить местоположение шунта на рельсовой линии (см. рисунок 1). Данные точки получаются путем конформного преобразования двух нагрузок (пересекающихся прямых мнимой и реальной осей выходных сопротивлений). В качестве нагрузки четырехполюсника рассматривается область значений комплексных сопротивлений, от значения $Z = 0$ – короткого замыкания – до $Z = \infty$ – разрыва или холостого хода. Так как действительная часть комплексного сопротивления всегда неотрицательна, после преобразования по правилам конформных отображений получаем две пересекающиеся окружности, в местах пересечения которых получаем точки нуля (W_0) и бесконечности (W_∞) мнимой и реальной осей соответственно [1, 4].

Рассмотрим траекторию движения данных точек для расчета комплексного входного сопротивления рельсовой линии при следующих условиях: несущая частота сигнального тока – 420 Гц, длина рельсовой линии – 625 м, сопротивление шунта – 0,03 – 0,25 Ом, интервал наложения шунта – 12,5 м, сопротивление изоляции рельсовой линии – 2,5 Ом/км. Изменение координат центров окружностей, точек нулей и бесконечностей, полученных в результате расчета показано на рисунке 5.

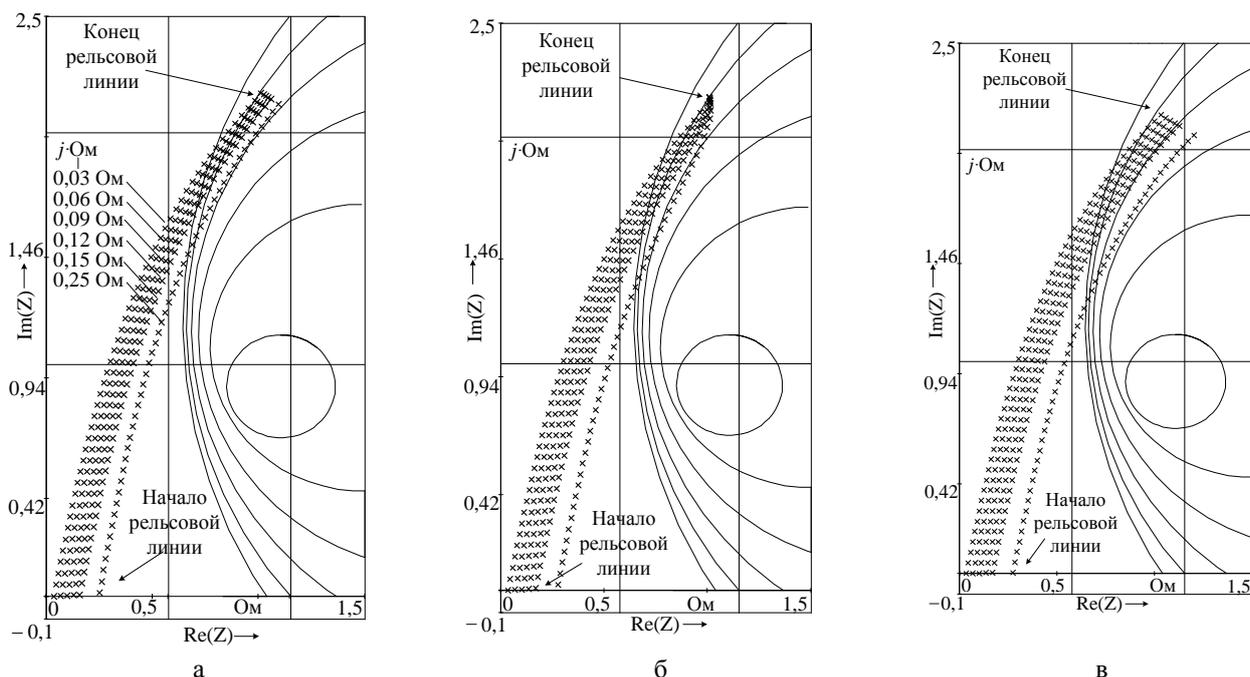


Рисунок 5 – Изменение координат центров окружностей (а), точек нулей (б) и бесконечностей (в)

Анализ результатов моделирования показал, что при коротком замыкании на выходе четырехполюсника рельсовой линии (рассматривается точка нуля W_0), определение координаты шунта в конце рельсовой линии затруднено (рисунок 5, б);

при разрыве на выходе четырехполюсника рельсовой линии (рассматриваются точки бесконечностей W_∞) определение координаты наложения шунта однозначно на всем ее протяжении (рисунок 5, в).

На основании предложенных расчетов и утверждений коллективом ученых ОмГУПС (ОмИИТа) получен патент «Устройство непрерывного контроля технического состояния рельсовых цепей» [5].

На основе изложенного можно сделать выводы.

1. Возможность применения математического аппарата конформных отображений подтверждена аналитическими расчетами.

2. Графическое отображение областей состояния рельсовой линии может быть использовано как наглядное и эффективное средство исследования функциональных зависимостей ее электрических характеристик от внутренних (проводимость изоляции, изменение сопротивления токопроводящих и изолирующих стыков) и внешних (помехи электрического тягового подвижного состава, линий электропередач) параметров в широком диапазоне их изменения.

3. Для исключения дискретности определения координаты наложения шунта целесообразно рассматривать нагрузку, соответствующую точкам бесконечности (наличие изолирующих стыков в конце рельсовой линии).

4. Координата наложения шунта может быть определена путем сопоставления расчетных кривых и полученных экспериментально значений входного сопротивления рельсовой линии.

5. Анализ рельсовой линии и определение ее параметров допускает графическое решение, точность которого достаточна. Использование автоматической классификации состояний рельсовой линии расширяет возможности их исследования в каждом из основных режимов работы, что особенно актуально для сложных условий эксплуатации.

Список литературы

1. Сероштанов, С. С. Методы и алгоритмы диагностирования технического состояния тональных рельсовых цепей [Текст]: Дис... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2006. – 137 с.

2. Шабат, Б. В. Введение в комплексный анализ [Текст] / Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

3. Сероштанов, С. С. Применение математического аппарата конформных отображений для непрерывного контроля и прогнозирования состояния тональных рельсовых цепей [Текст] / С. С. Сероштанов, С. А. Лунев // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2006. – № 9 (46). – С. 98 – 102.

4. Сероштанов, С. С. Непрерывный контроль технического состояния рельсовых цепей [Текст] / С. С. Сероштанов, Р. Ш. Аюпов / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного трансп. – Новосибирск. – 2008. – № 2. – 288 – 290 с.

5. Пат. 78580 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02. Устройство непрерывного контроля технического состояния рельсовых цепей [Текст] / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов (Россия). – № 2008131276/22; Заявлено 29.07.2008; Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

УДК 629.4.027

М. Х. Минжасаров

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В статье приведен краткий теоретический анализ особенностей железнодорожных экипажей с нелинейными упругими элементами. Рассмотрены отличительные черты рессорного подвешивания электровозов старого и новых поколений. На основе отличий построена расчетная схема и выведена математическая модель вертикальной динамики условного «одноосного» электровоза нового поколения, позволяющая оценить критическую скорость железнодорожного экипажа и показатели его динамических качеств.

Железнодорожный экипаж и путь приставляют собой единую нелинейную механическую систему, которую называют таковой, если нелинейны соотношения, описывающие процессы ее движения или статического деформирования, в частности, если хотя бы одна из обобщенных сил нелинейно связана с обобщенными координатами и (или) обобщенными скоростями. Хотя всякая реальная механическая система в той или иной степени нелинейна [1]. При исследовании рессорного подвешивания единиц подвижного состава железных дорог необходимо опираться на современные достижения теории колебаний и автоматического регулирования и рассматривать подрессоренную единицу как разомкнутую систему автоматического регулирования. Системы автоматического регулирования бывают как линейные, так и нелинейные – в зависимости от наличия в системе звеньев с нелинейной статической характеристикой.

Система «экипаж – путь» как нелинейная механическая система содержит ряд характерных черт, которые вносят особенности в исследование ее колебаний. К ним следует отнести нелинейные упругие элементы (пружины, рессоры, пневморессоры), фрикционные гасители колебаний, нелинейную жесткость основания пути, билинейные упругие амортизаторы, связи кузова и тележек, выполненные с предварительным натяжением пружин, силы крипа. Рассмотрим наиболее важные из особенностей нелинейной системы «экипаж – путь».

Во-первых, нелинейные динамические системы не подчиняются принципу суперпозиции, который широко применяется для исследования линейных систем. В этом главное отличие свойств нелинейных систем от свойств линейных [1].

Во-вторых, важной особенностью нелинейных механических систем является формальная возможность существования нескольких решений, характеризующих состояние системы при заданных значениях ее параметров и параметров возмущающего действия. Поэтому при исследовании колебаний таких систем возникает проблема оценки возможности существования нескольких состояний системы, отбора действительно реализуемых состояний или оценки вероятности появления того или иного состояния [1].

В-третьих, на динамическое поведение железнодорожных экипажей значительное влияние оказывают силы взаимодействия колеса и рельса. Эти силы зависят от характеристик сцепления колес с рельсами, упругого скольжения или крипа, а также от износа колеса и рельса и параметров рельсовой колеи. На перечисленные характеристики влияют геометрия профилей колеса и рельса и динамическое поведение самого экипажа, так как силы крипа существенно зависят от площади контакта и контактного напряжения между колесом и рельсом [2].

Как показали исследования сил взаимодействия колеса и рельса, модель этого взаимодействия не может быть описана в рамках линейной теории. В частности, необходимо учесть следующие нелинейные факторы: нелинейные геометрические функции колеса и рельса, связанные с профилями колеса и рельса, и ограничения на область сцепления, которые накладываются на соотношение между силой крипа и крипом. Модель, применяемая для описания взаимодействия колеса и рельса, носит нелинейный характер, следовательно, данное обстоятельство будет вносить нелинейность во всю динамику системы «экипаж – путь».

Важной особенностью колебаний железнодорожных экипажей является случайный характер внешних возмущений. Математически это возмущение описывается случайной функцией. В теории случайных процессов для характеристики случайных функций пользуются статистическими характеристиками, которые являются не числами, а функциями, причем функциями неслучайными. Для стационарных случайных процессов такими характеристиками являются корреляционная функция и спектральная плотность [3].

В настоящее время не существует единой точки зрения относительно математической модели внешнего возмущения. Теоретическому и экспериментальному изучению возмущений, действующих на рельсовые экипажи со стороны пути, посвящены работы отечественных и зарубежных ученых. При этом делались многочисленные попытки описания экспери-

ментальных данных о возмущениях с помощью аналитических выражений. Однако так как эксперименты проводились в разных условиях (например, различное состояние участков железных дорог и подвижного состава, отличающиеся по конструкции экипажи, неодинаковые погодные условия и др.) и с использованием различных методик, то полученные при этом результаты в ряде случаев существенно отличаются друг от друга. Это иногда затрудняет их использование при теоретических исследованиях колебаний рельсовых экипажей. Краткий анализ этих работ приведен в монографии [3].

Процесс возникновения колебаний в движущемся экипаже связан с необходимостью исследования нелинейной системы при случайных параметрических возмущениях, поскольку реакции пути и подвешивания нелинейно связаны с их деформациями. Однако результаты многочисленных натурных исследований взаимодействия подвижного состава и пути, как и опыт эксплуатации, не обнаруживают явлений, характерных для параметрических колебаний или систем с существенно нелинейными свойствами.

Это объясняется преимущественно низким относительным уровнем таких возмущений. Вместе с тем объективно проявляется общее увеличение жесткости пути в случае глубокого промерзания полотна зимой. Экспериментально показано, что в вертикальном направлении рельсовый путь имеет жесткость, меняющуюся по мере роста нагрузки, выбора зазоров и сжатия подрельсовых прокладок; жесткость, вначале низкая, значительно возрастает, а затем остается практически постоянной, если отвлечься от ее изменения в пределах шпального ящика, т. е. система приобретает свойства линейной системы.

В связи с этим непостоянство свойств пути по длине практически эквивалентно некоторой случайной геометрической неровности. Все это позволяет в качестве возмущающей функции принять некоторую эквивалентную геометрическую неровность пути $\eta(x)$, которая приближенно учитывает все причины, вызывающие появление колебаний подвижного состава. Статистические характеристики эквивалентной геометрической неровности получают экспериментально при записи ускорений букс колесных пар или их абсолютных перемещений.

Нелинейные упругодемпфирующие связи, применяемые на единицах подвижного состава, – еще одна немаловажная особенность в системе «экипаж – путь». В рессорном подвешивании подвижного состава нашли широкое применение витые пружины (цилиндрические и конические), листовые рессоры, билинейные упругие элементы, пневморессоры, фрикционные гасители и гидродемпферы.

Витые цилиндрические пружины применены в рессорном подвешивании всех видов подвижного состава. На рисунке 1, а – пружины типа «Flexicoil», применяемые на кузовной ступени рессорного подвешивания грузовых электровозов 2ЭС6 «Синара», 2ЭС10 «Гранит», 2ЭС4К «Дончак», пассажирского электровоза ЭП2К; б – пружины буксовой ступени. При этом силовые характеристики витых пружин напрямую зависят от их формы и расположения относительно друг друга в конструкции подвески. Цилиндрические пружины имеют линейную силовую характеристику. При параллельной работе нескольких пружин (двухрядных) силовая характеристика становится билинейной в тех случаях, когда одна пружина по высоте меньше другой. Кубическую упругую характеристику имеют конические металлические пружины, или пневморессоры, которые нашли широкое применение в скоростном движении. У винтовых пружин, образующая которых выполнена в виде конуса, а также у резинокордных упругих элементов коэффициент жесткости возрастает с увеличением приложенной силы, и в результате силовая характеристика является жесткой. Жесткая силовая характеристика, представленная кривой и описываемая, как правило, кубической нелинейностью (или тангенсоидой), предпочтительна для плавного ограничения динамического хода системы обрессоривания и получения, во многих случаях, наилучших показателей динамических качеств [4].

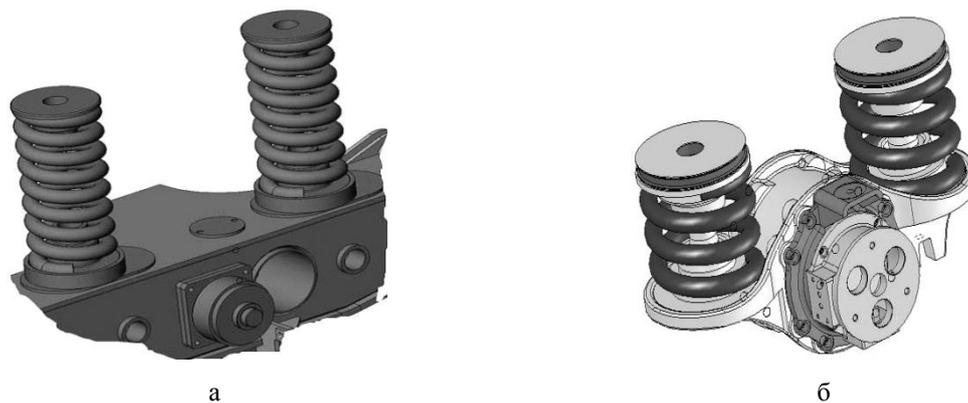


Рисунок 1 – Витые пружины кузовной и буксовой ступеней обрессоривания экипажа

Рассмотрим характеристики листовых рессор, нашедших широкое применение в буксовой ступени рессорного подвешивания электровозов ВЛ10, ВЛ80, ВЛ85, которые еще выполняют значительную полезную работу. При этом рессоры выполняют одновременно функции как гасителя колебаний, так и упругих восстанавливающих элементов. Однако, как показывает практика, поверхность отдельных листов рессоры подвержена коррозии, которая в свою очередь приводит к изменению коэффициента трения между листами и, как следствие, к увеличению силы трения между листами. Происходит увеличение жесткости, вследствие чего рессора перестает выполнять своих функций. Данное обстоятельство приводит к изменению структуры схемы обрессоривания экипажа и повышению воздействия на путь. Поэтому перед исследователями стоит задача определения условий анкилозиса листовой рессоры.

Учеными кафедры «Теоретическая механика» ОмГУПСа было получено следующее простое и ясное с физической точки зрения соотношение [3]:

$$\sigma_z > \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{F_0}{\lambda c_1} \quad (1)$$

Если удвоенное среднеквадратическое отклонение подпрыгивания колесной пары будет больше, чем умноженный корень из двух и деленный на π , прогиб пружины буксового подвешивания экипажа под действием постоянной силы, равной по величине силе сухого трения листовой рессоры, то она будет работать в процессе движения подвижного состава по железнодорожному пути со случайными геометрическими неровностями на поверхности катания рельсов, в противном случае рессора будет заблокирована, что резко увеличит жесткость системы обрессоривания и в результате – воздействие на путь.

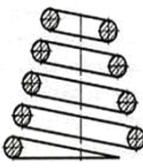
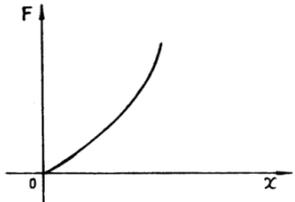
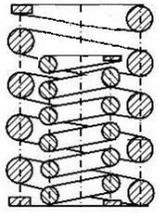
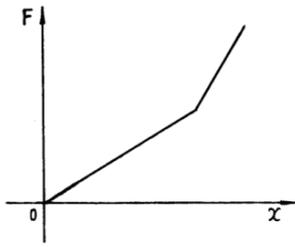
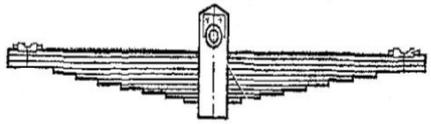
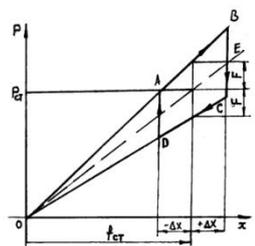
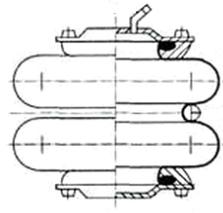
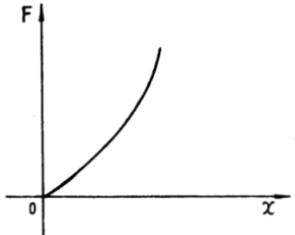
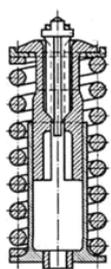
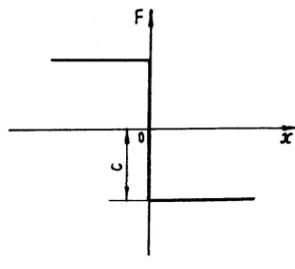
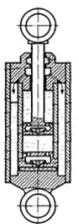
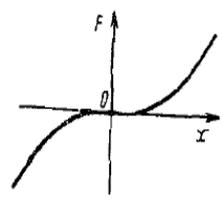
Следовательно, анализ режимов колебаний при этом необходимо проводить как при заблокированных, так и при разблокированных упругих связях.

Силовые характеристики наиболее распространенных упругих элементов, применяемых в рессорном подвешивании подвижного состава, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Упругие элементы рессорного подвешивания подвижного состава и их силовые характеристики

Упругий элемент (применяемость) 1	Рисунок 2	Силовая характеристика 3
Цилиндрическая пружина (все виды подвижного состава): $F = kx$		

Окончание таблицы 1

1	2	3
<p>Коническая пружина (на некоторых видах тягового подвижного состава):</p> $F = kx^3$		
<p>Билинейный упругий элемент (на некоторых типах вагонов):</p> $\begin{cases} F = k_1x, & x \leq x_0; \\ F = k_2x, & x > x_0 \end{cases}$		
<p>Листовая рессора (на морально устаревших видах подвижного состава, например, электровозы ВЛ10 и ВЛ 80):</p> $F = kx(1 \pm f_{тр})$		
<p>Пневморессоры (высокоскоростные электропоезда «Сапсан»):</p> $F = \alpha x + \beta x^2 + \gamma x^3$		
<p>Фрикционный гаситель колебаний (на тележках грузовых и пассажирских вагонов):</p> $F = -c \operatorname{sign}(x)$		
<p>Гидродемпфер (на пассажирских вагонах и на тяговом подвижном составе):</p> $F = \alpha \dot{x} + \beta \dot{x}^3$		

Одним из путей эффективной виброзащиты надрессорного строения подвижного состава, создания комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала является использование в рессорном подвешивании резинокордных пневматических упругих элементов (рисунок 2). Такая необходимость обусловлена прежде всего тем, что возможности существующих типовых металлических рессор почти исчерпаны и дальнейшее улучшение качественных показателей динамики подвижного состава железных дорог на их основе маловероятно, что осо-

бенно актуально для скоростного и высокоскоростного движения в современных условиях развития нашей страны.

Все перечисленные выше особенности нелинейной модели «экипаж – путь» позволяют сделать вывод о том, что задача исследования динамики железнодорожного экипажа является сложной практической задачей, при решении которой необходимо учитывать множество факторов, в той или иной степени влияющих на решение.

В последние десять лет компания ОАО «РЖД» проводит активную политику обновления парка тягового подвижного состава, в частности, электровозов старого поколения (ВЛ10, ВЛ60, ВЛ80, ВЛ85, ЧС2) на электровозы нового поколения (2ЭС6, 2ЭС10, ЭП2К, 2ЭС4К). При этом основное конструктивное отличие рессорного подвешивания электровозов нового поколения заключается в отсутствии в буксовой ступени рессорного подвешивания листовых рессор, демпфирующие свойства которых теперь выполняет гаситель вязкого трения, установленный параллельно основным пружинам. В кузовной ступени подвешивания взамен люлечного подвешивания применены многофункциональные винтовые пружины (Flexicoil), которые предназначены как для восприятия вертикальных нагрузок, так и для создания возвращающих моментов при поперечном и угловом перемещении тележки относительно кузова.

При этом возникает вопрос актуализации математических моделей динамики подвижного состава. Следует отметить то обстоятельство, что отказ от листовых рессор в буксовом уровне подвешивания должен привести к упрощению математических моделей системы «экипаж – путь», так как процесс описания поведения листовой рессоры довольно трудоемок. В силу своей цилиндрической формы пружины, применяемые как в буксовом, так и в кузовном уровне подвешивания, имеют линейную силовую характеристику. Как показывает практика, упругие элементы с линейной характеристикой уступают по своим динамическим качествам нелинейным элементам, в частности, элементам с кубической упругой характеристикой.

Основные характеристики рессорного подвешивания нового и старого поколений локомотивов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры рессорного подвешивания электровозов

Марка электровоза	Параметры буксового подвешивания		Параметры кузовного подвешивания	
	статическая нагрузка, кгс	статический прогиб, мм	статическая нагрузка, кгс	статический прогиб, мм
Электровозы старого поколения				
ВЛ10	8500	65	7000	77
ВЛ80	8500	65	7000	73,5
ЧС4	–	100	–	40
Электровозы нового поколения				
2ЭС4К	4628	65	6500	120
2ЭС6	–	58	–	105
2ЭС10	–	56	–	110
ЭП2К	4625	97	4080	118

Изложим предпосылки для формирования математической модели вертикальной динамики экипажа. В качестве исследуемой модели рассмотрим модель вертикальных колебаний экипажа, в которой в буксовой ступени подвешивания вместо цилиндрической пружины и листовой рессоры (ВЛ10, ВЛ80, ЧС2, ВЛ85) установлены упругий элемент в виде цилиндри-

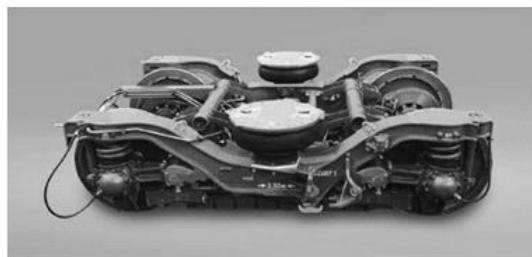


Рисунок 2 – Тележка высокоскоростного электропоезда «Сапсан»

ческой пружины и гидродемпфер (2ЭС6, 2ЭС10, ЭП2К, 2ЭС4К). Плоская модель, приведенная на рисунке 3, соответствует секции современных локомотивов с осевой формулой 2₀-2₀ и имеет 14 степеней свободы.

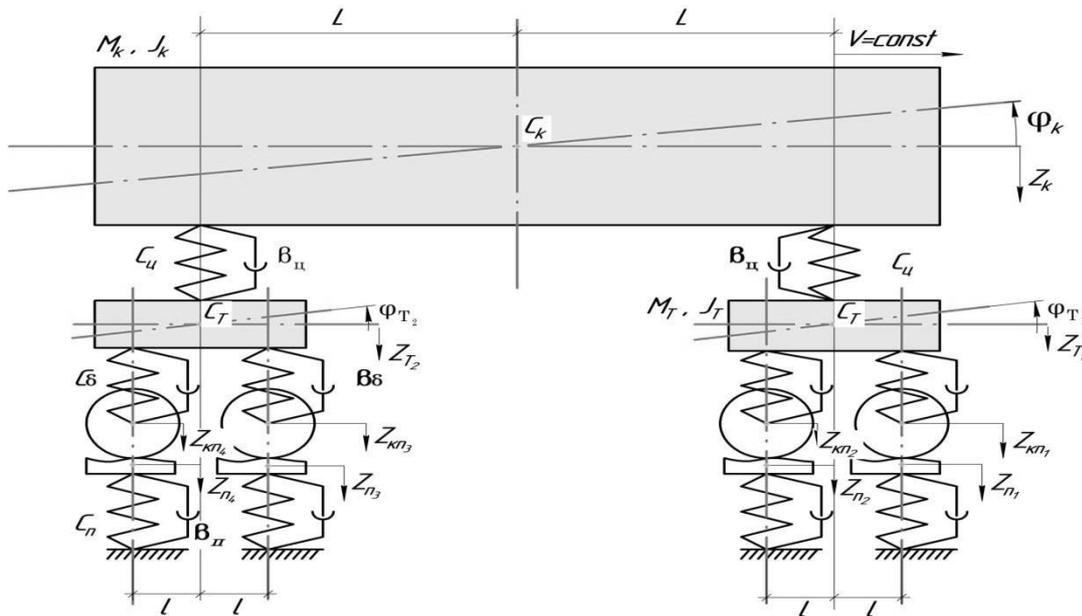


Рисунок 3 – Плоская модель современного электровоза

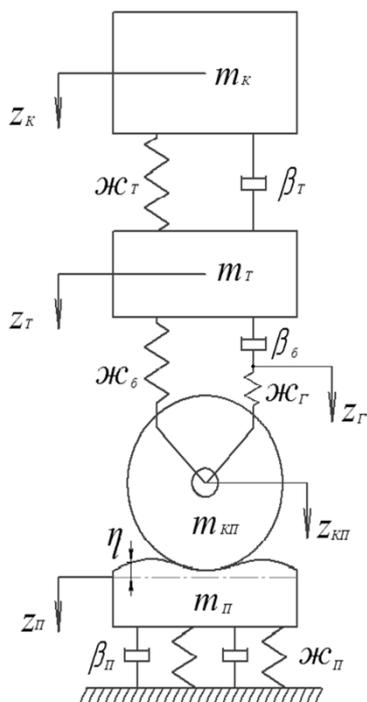


Рисунок 4 – Расчетная схема

При построении моделей железнодорожных экипажей желательнее разрабатывать достаточно простые модели, которые адекватно учитывали бы динамические свойства системы, подлежащей исследованию. Простота модели определяется в большей мере числом степеней свободы. При составлении моделей нужно стремиться к минимизации числа степеней свободы системы, но следует иметь в виду то, что это приведет к увеличению погрешностей расчета. Оптимизация числа степеней свободы системы возможна как на стадии составления расчетной схемы, как это приведено в работе [5], в данном случае упрощение происходит исходя из допущения пренебрежения массами тележек по сравнению с массой кузова, так и после составления дифференциальных уравнений, в частности, по методике эквивалентного преобразования систем дифференциальных уравнений [6].

Для упрощения расчета вместо плоской модели используем одноосную модель, которая имеет пять степеней свободы и позволяет определить характеристики вертикальных колебаний для тележки и кузова локомотива. Особенность такой модели заключается в том, что все параметры экипажной части и пути приведены к одной оси колесной пары, что отражено в расчетной схеме (рисунок 4). Фактически приведенная модель является частным случаем плоской модели, если учитывать

воздействие пути как сосредоточенное или, другими словами, оказывающее одинаковое влияние на все колесные пары в определенный момент времени. Не менее важным упрощением является то, что масса тяговых электродвигателей приведена к колесным парам [7]. Следует отметить и то, что данная одноосная модель вполне применима и для пассажирского электровоза ЭП2К, который имеет осевую формулу 3₀-3₀, и, как следствие, плоская модель которого будет иметь 18 степеней свободы.

Для данной системы составим дифференциальные уравнения колебания кузова, тележек, колесной пары и пути. Решим задачу, используя уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = \sum F_i. \quad (2)$$

В первую очередь введем параметры, необходимые для расчета: z_k – вертикальное перемещение кузова; z_t – вертикальное перемещение тележки; $z_{кп}$ – вертикальное перемещение колесной пары; $z_{п}$ – вертикальное перемещение пути; η – случайная геометрическая неровность пути; m_k – масса кузова; m_t – масса обрессоренных частей тележки; $m_{кп}$ – масса колесной пары; $m_{п}$ – приведенная масса пути; $ж_t$ – жесткость кузовной ступени подвешивания; $ж_б$ – жесткость буксовой ступени подвешивания; $ж_{п}$ – приведенная жесткость пути; β_t – коэффициент вязкого трения кузовной ступени подвешивания; $\beta_б$ – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_{п}$ – приведенный коэффициент вязкого трения пути; q_i и \dot{q}_i – соответственно i -я обобщенная координата и обобщенная скорость.

Необходимо найти все виды механической энергии системы и обобщенные силы для каждой из координат и составить систему из трех дифференциальных уравнений, однозначно определяющих механическую систему:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_k} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial z_k} = 0; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_t} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_t} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_t} + \frac{\partial \Pi}{\partial z_t} = 0; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_{кп}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z_{кп}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_{кп}} + \frac{\partial \Pi}{\partial z_{кп}} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Находим все необходимые слагаемые в уравнений (4) по каждой из координат, подставляем в систему (3), преобразуем и получим систему уравнений динамики системы:

$$\begin{cases} m_k \ddot{z}_k + \beta_t \dot{z}_k + ж_t z_k - \beta_t \dot{z}_t - ж_t z_t = 0; \\ m_t \ddot{z}_t + \beta_t (\dot{z}_t - \dot{z}_k) + \beta_б (\dot{z}_{кп} + \dot{z}_t) + ж_t (z_t - z_k) - ж_б (z_t - z_{кп}) = 0; \\ (m_{кп} + m_{п}) \ddot{z}_{кп} + \beta_б (\dot{z}_{кп} - \dot{z}_t) + \beta_{п} \dot{z}_{кп} + ж_б (z_{кп} - z_t) + ж_{п} z_{кп} = m_{п} \ddot{\eta} + \beta_{п} \dot{\eta} + ж_{п} \eta; \\ ж_{п} (z_{п} - z_{кп}) - \beta_б (\dot{z}_t - \dot{z}_k) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Полученная система дифференциальных уравнений является актуальной для оценки вертикальной динамики электровозов 2ЭС6, 2ЭС7, ЭП2К, 2ЭС4К.

Исследование динамики рельсовых железнодорожных экипажей обычно приводит к системам дифференциальных уравнений высокого порядка, и если механическая система линейная или каким-либо способом линеаризована, то следует применить матричный метод, который позволяет свести задачу изучения динамических качеств подвижного состава к одному дифференциальному уравнению вида:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = D\ddot{\eta} + E\dot{\eta} + F\eta, \quad (5)$$

где A , B , C – матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов соответственно; D , E , F – вспомогательные матрицы, характеризующие инерционные, диссипативные и жесткостные параметры железнодорожного пути (обычно они являются диагональными, но отличны от нуля только элементы в конце и их число равно числу колесных пар в

экипаже); \bar{q} – вектор обобщенных координат, выбранных исследователем для описания динамического поведения экипажа; $\bar{\eta}$ – вектор возмущения (обычно отличны от нуля только элементы для колесных пар, ибо на них оказывают воздействие геометрические неровности железнодорожного пути).

Отметим, что в буксовом рессорном подвешивании электровозов ВЛ10 и ВЛ80 применяются листовые рессоры. Элементы с сухим трением применяются также в тележках грузовых вагонов, но так как они обладают нелинейной силовой характеристикой, то может показаться, что данный аппарат неприменим. Однако сделаем следующее замечание – существует два способа линеаризации нелинейных характеристик.

Первый заключается во введении эквивалентного вязкого трения, который определяется через работу, совершаемую элементом трения на периоде колебания, она приравнивается к работе, совершаемой вязким трением на том же периоде. Однако если внешнее воздействие является случайным, то эквивалентный коэффициент вязкого трения оказывается зависящим от среднеквадратического отклонения скорости деформации листовой рессоры, а передаточные функции будут разрешены неявно.

Второй способ был предложен профессором Батем М. И. [8], рассмотревшим динамическое поведение системы, в которой сопротивление гасителей пропорционально их перемещениям (это действительно больше подходит для листовой рессоры, так как обычно осуществляемая исследователями замена ее реальной силовой характеристики сухим трением – это тоже идеализация, но и характеристика сухого трения представляет собой идеализацию) и получившим эквивалентный коэффициент демпфирования колебания в виде:

$$n = \frac{4 \ln \sqrt{\frac{1+\psi}{1-\psi}} \sqrt{\frac{c}{m}}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 \sqrt{\frac{1+\psi}{1-\psi}}}}. \quad (6)$$

Здесь $\psi = 0,04 - 0,08$ – коэффициент относительного трения (цифры указаны для подвижного состава); $\sqrt{c/m}$ – собственная частота системы (в наших исследованиях под ней будем понимать «парциальную» частоту). Этот подход широко использовался профессором Коганом А. Я. [9] при исследовании воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. Поэтому данный способ линеаризации характеристики сухого трения в листовой рессоре будем считать основным и применять в своих исследованиях динамических качеств подвижного состава.

Если внешнее возмущение, являющееся для подвижного состава кинематическим, носит случайный характер, то, пользуясь известным соотношением Винера – Хинчина, можно вычислить значения спектральной плотности для всех выходных координат, а следовательно, и все среднеквадратические отклонения для выбранных обобщенных координат. Эти соотношения дают возможность, если принять плотность распределения вероятностей всех случайных процессов нормальной, определить наиболее вероятные максимальные значения каждой обобщенной координаты, что важно с практической точки зрения. Для рассматриваемого примера векторы будут такими:

$$\bar{q} = \begin{pmatrix} z_k \\ z_T \\ z_{к.п} \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\bar{W} = \begin{pmatrix} W_k(p) \\ W_T(p) \\ W_{к.п}(p) \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$\bar{W} = \begin{pmatrix} W_K^{Re}(\omega) \rightarrow W_1 \\ W_T^{Re}(\omega) \rightarrow W_2 \\ W_{к.п}^{Re}(\omega) \rightarrow W_3 \\ W_K^{Im}(\omega) \rightarrow W_4 \\ W_T^{Im}(\omega) \rightarrow W_5 \\ W_{к.п}^{Im}(\omega) \rightarrow W_6 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Модули передаточных функций для кузова, тележки и колесной пары приведены на рисунках 5 – 7.

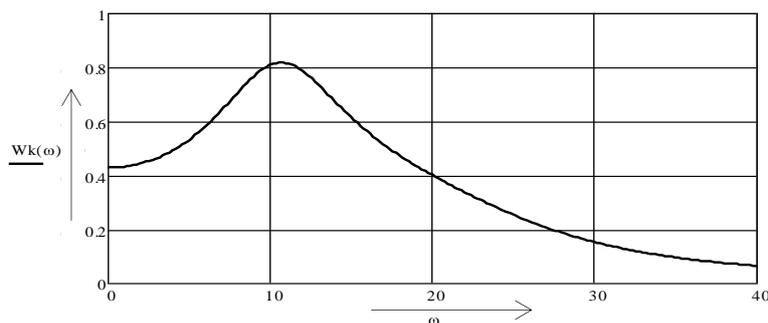


Рисунок 5 – Модуль передаточной функции для кузова ЭП2К

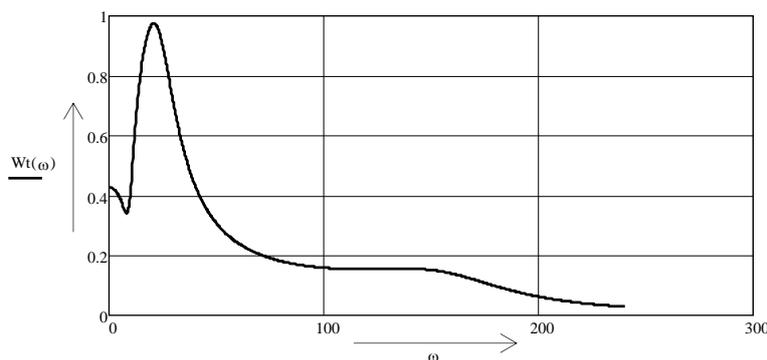


Рисунок 6 – Модуль передаточной функции для тележки ЭП2К

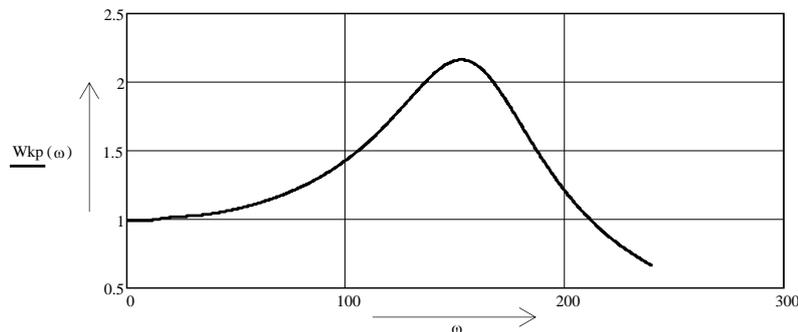


Рисунок 7 – Модуль передаточной функции для колесной пары ЭП2К

Из представленных графиков на рисунках 5 – 7 отчетливо видно, что модули передаточных функций имеют «пики» на собственных парциальных частотах порядка 1,5; 3,47 и 24,19 Гц. Причем на передаточной функции тележки нетрудно обнаружить сглаженный «пик», принадлежащий колесной паре. С помощью приведенных передаточных функции удобно определять любой параметр на выходе из системы (максимальное значение или стандарт),

который принимают в качестве операторов для оценки динамических качеств электровоза ЭП2К.

Список литературы

1. Вибрация в технике: Справочник: В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем [Текст] / Под ред. И. И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1980. – 351 с.
2. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава [Текст] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – 388 с.
3. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961 – 2011) [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – 175 с.
4. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2010. – 340 с.
5. Ахмадеева, А. А. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4. – С. 25 – 28.
6. Хохлов, А. А. Динамика сложных механических систем [Текст] / А. А. Хохлов / МИИТ. – М., 2002. – 172 с.
7. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / И. В. Бирюков. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
8. Бать, М. И. Вынужденные колебания в системе с гистерезисом [Текст] / М. И. Бать // Прикладная математика и механика / АН СССР. – М., 1940. – Т. 4. – Вып. 3. – С. 13 – 30.
9. Коган, А. Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную нагрузку [Текст] / А. Я. Коган // Науч. тр. / ВНИИЖТ. – М., 1973. – Вып. 502. – 243 с.
10. Основы механики подвижного состава [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – Ч. 2. – 165 с.

УДК 519.6:311

В. Ф. Фролов, В. А. Начигин

ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Предложены формализация и постановка многокритериальной задачи выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса железнодорожным транспортом на региональном уровне, учитывающей, что этот процесс является сложной системой, функционирующей в условиях многовариантности и неопределенности.

В соответствии с Федеральным законом о железнодорожном транспорте перевозочный процесс – это совокупность организационно и технологически взаимосвязанных операций, выполняемых при подготовке, осуществлении и завершении перевозок пассажиров, грузов, багажа и грузобагажа железнодорожным транспортом.

Особенностью перевозочного процесса на региональном уровне является то, что он осуществляется совокупностью дирекций, филиалов и служб, имеющих центральное управление. Это потребовало реализации усовершенствованной системы управления компанией ОАО «РЖД»: в ее вершине – Корпоративный центр, возглавляемый президентом ОАО «РЖД», а в регионах – региональные центры корпоративного управления (РЦКУ), возглавляемые начальниками железных дорог [1]. Базовой функцией РЦКУ является обеспечение технологической и корпоративной координации всех структурных подразделений филиалов, центральных дирекций и дочерних зависимых обществ, осуществляющих свою деятельность в границах дороги.

Схема взаимодействия РЦКУ и территориальных дирекций, функционирующих в границах дороги, показана на рисунке 1. Дополнительно показаны связи РЦКУ с Корпоративным центром, который возглавляется президентом компании ОАО «РЖД», и территориальных дирекций со своими центральными дирекциями и Корпоративным центром.

Основной системный результат этого взаимодействия заключается в следующем: РЦКУ, с учетом данных начальнику дороги полномочий, занимается управлением процессами единой производственной системы, функционирующей в пределах дороги, а не управлением территориальными дирекциями. Но при этом обязательно необходимо учитывать горизонтальные связи между территориальными дирекциями, при соблюдении их вертикальных связей со своими центральными дирекциями.

Инструментом управления РЦКУ являются современные информационные технологии, которые реализуются автоматизированными системами управления перевозочным процессом как единой производственной системой.

Помимо изменения структуры и функций управления компанией потребовались структурные изменения перевозочного процесса на уровне железнодорожной сети, в частности, внедрение комплексных полигонных технологий и создание новых структурных подразделений в виде центров управления тяговыми ресурсами. Полигонные технологии позволяют объединять процессы и ресурсы территориальных дирекций различных дорог с целью получения системных результатов.

Использование полигонных технологий требует пересмотра и других технологий, в частности, схемы управления инфраструктурным и локомотивным комплексом и его технического обслуживания, а также регулирования парка локомотивов и локомотивных бригад. Важным компонентом является разработка и внедрение единого сетевого технологического процесса, необходимого для реализации новой технологии перевозочного процесса, которая учитывает наличие большого числа операторов грузовых вагонов.

Перевозочный процесс железнодорожным транспортом является сложной системой, функционирующей в условиях неопределенности. Неопределенность функционирования перевозочного процесса связана с двумя основными причинами: 1) на него воздействует большое число факторов, часть из которых имеет вероятностный характер; 2) в компании ОАО «РЖД» динамично происходит модернизация в сфере управления, организации и технологий, что создает его многовариантность и неопределенность.

В 2013 г. приказом начальника ВСЖД утверждены положение о центре оперативного управления и регламент взаимодействия этого центра со структурными подразделениями, филиалами, дочерними и зависимыми обществами ОАО «РЖД», осуществляющими свою деятельность в границах ВСЖД. Этот центр является структурным подразделением РЦКУ.

По мере своего развития центр оперативного управления должен выполнять дополнительные функции, связанные с задачами стратегического управления, реализуя сценарный подход по прогнозированию эксплуатационной ситуации. Фактически центр оперативного управления будет выполнять функции центра управления процессами, а это возможно при наличии инструментальных средств по выбору предпочтительного сценария развития перевозочного процесса. Отметим, что в теории принятия решений выбор наилучшей альтернативы в условиях неопределенности является одной из распространенных задач [2].



Рисунок 1 — Схема взаимодействия РЦКУ и территориальных дирекций

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Пусть $S = (S_j, j=1, 2, \dots, J)$ – множество сценариев развития перевозочного процесса, учитывающих полигонные технологии, изменения функций управления и другие влияющие факторы; S_j – j -й сценарий развития; J – общее число сценариев. Эти сценарии совместно со значениями исходных данных готовятся специалистами-экспертами.

На рисунке 2 приведена блок-схема, отражающая взаимодействие процедур выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса, где 1 – процедура вычисления значений локальных показателей эффективности ($Y1$), Z – матрица исходных данных; 2 – процедура получения значений целевых показателей (Y), которые помимо локальных показателей содержат экспертно отобранные технологические показатели ($Y2$); 3 – процедура вычисления значений обобщенных критериев, характеризующих перевозочный процесс, и выбора по этим значениям предпочтительных сценариев развития этого процесса ($S_{jp}(k), S_{jp}$).

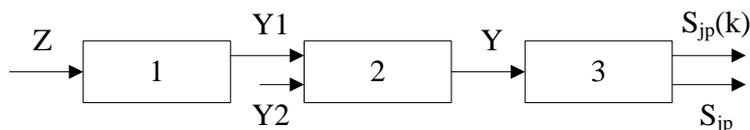


Рисунок 2 – Блок-схема, отражающая взаимодействие процедур выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса

В качестве исходных данных для вычисления значений локальных показателей эффективности предлагается шесть величин: G – эксплуатационный грузооборот, млрд ткм; Zn – переменные затраты на единицу грузооборота, млн р. / млрд ткм; Zp – постоянные затраты, млн р.; C – цена единицы перевезенного грузооборота (себестоимость), млн р. / млрд ткм; D_o – величина дотаций, млрд р.; In – величина вложенных инвестиций в модернизацию компонентов перевозочного процесса, млрд р.

Модели вычисления локальных показателей эффективности приведены ниже, они взяты из литературных источников, включая работу авторов [3 – 5], но доработаны с учетом применения компьютерного моделирования.

1. Затраты за год, млн р.,

$$V = Zn \cdot G + Zp. \quad (1)$$

2. Доходы за год, млн р.,

$$Q = C \cdot G + D_o. \quad (2)$$

3. Операционная прибыль как разница доходов и расходов, млн р.,

$$PR = (C - Zn) G + D_o - Zp. \quad (3)$$

4. Операционный риск, содержащий три показателя:

s_{op} – среднеквадратическое отклонение операционной прибыли, млн р.;

v_{op} – коэффициент вариации операционной прибыли в процентах,

$$v_{op} = 100 s_{op} / MPR; \quad (4)$$

R_o – операционный риск как вероятность события

$$R_o = P(PR < OP_3), \quad (5)$$

где OP_3 – заданная операционная прибыль.

5. Показатель рентабельности инвестиций, %,

$$RI = (PR / In) \cdot 100, \quad (6)$$

где In – объем инвестиций.

6. Риск по показателю рентабельности инвестиций, как вероятность события

$$R_I = P(RI < RI_3), \quad (7)$$

где RI_3 – заданное значение показателя рентабельности инвестиций.

С учетом вероятностного характера исходных данных, что связано с тем, что перевозочный процесс функционирует в условиях неопределенности, локальные показатели эффективности являются случайными величинами. В связи с этим при вычислении данных показателей предложено использовать компьютерное моделирование.

При компьютерном моделировании для описания исходных данных как случайных величин предлагается использовать различные функции распределения: 1) нормальный закон (N); 2) равномерный закон (R) на интервале (a, b) ; 3) гамма-распределение (GM); 4) логарифмически-нормальное распределение (LN); 5) распределение Бирнбаума – Саундерса (BS); 6) распределение Вейбулла (W). Все распределения зависят от двух параметров, поэтому для их определения необходимо первоначально оценить математическое ожидание и коэффициент вариации. Возможное закрепление функций распределения за исходными данными приведено в работах [4, 5]. В качестве примера рассмотрим закрепление функций, использованное в работе [5]: $G \rightarrow BS$, $C \rightarrow GM$, $Zp \rightarrow R$, $Zn \rightarrow N$, $In \rightarrow LN$.

При компьютерном моделировании, умея моделировать значения случайных величин, по моделям (3) – (7) вычисляются значения локальных показателей эффективности. В результате по каждому показателю получают выборки необходимого объема:

$$X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n). \quad (8)$$

Далее каждая выборка (8) обрабатывается стандартными вероятностно-статистическими методами: создается гистограмма относительных частот, определяются точечные и интервальные оценки числовых характеристик и т. д. В качестве примера приведем точечную (\tilde{x}) и интервальную (x_1, x_2) оценки для математического ожидания:

$$\begin{cases} \tilde{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n; \\ x_1 = \tilde{x} - \delta; \\ x_2 = \tilde{x} + \delta; \\ \delta = z_\gamma s / \sqrt{n}, \end{cases} \quad (9)$$

где z_γ – квантиль нормированного нормального распределения при доверительной вероятности γ ; s – оценка среднеквадратического отклонения,

$$s = \sqrt{s^2}, \quad (10)$$

где s^2 – оценка дисперсии,

$$s^2 = (\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\tilde{x}^2) / (n - 1). \quad (11)$$

На первом этапе процедуры вычисления значений целевых показателей к полученным значениям локальных показателей эффективности ($Y1$) добавляются значения экспертно отобранных технологических показателей по всем сценариям ($Y2$): 1) vu – участковой скорости, км/ч; 2) pl – производительности локомотива, тыс. ткм/сут; 3) pv – производительности грузового вагона, ткм/сут; 4) pg – среднего веса грузового поезда, т; 5) ov – оборота грузового вагона, сут.

На втором этапе процедуры исключаются связанные между собой показатели. Для связанных показателей сценарии развития перевозочного процесса отличаются друг от друга несущественно. Подобные показатели названы целевыми, Y – матрица значений целевых показателей.

Выбор предпочтительного сценария развития перевозочного процесса базируется на следующих положениях.

1) Предполагается, что экспертно получен «наилучший» («идеальный») сценарий развития перевозочного процесса (S_0). Этот сценарий характеризуется следующими свойствами: а) если целевой показатель минимизируется, то у «наилучшего» сценария этот показатель имеет наименьшее значение; б) если целевой показатель максимизируется, то у «наилучшего» сценария этот показатель имеет наибольшее значение. Подчеркнем, что подобный подход описан в литературе и рекомендуется для решения практических задач [6]. В данной статье этот подход впервые предложен для выбора сценария развития перевозочного процесса железнодорожным транспортом.

2) Наличие «наилучшего» сценария развития позволяет преобразовать фактические значения целевых показателей (Y) в нормированные целевые показатели (метрики «близости») (D), которые учитывают их различную размерность и диапазон изменения, а также факт наличия показателей, которые надо либо максимизировать, либо минимизировать. Модель преобразования будет приведена ниже.

3) Предполагается, что целевые показатели имеют различную относительную важность. Эта важность характеризуется «весами» или «коэффициентами важности», полученными на основе экспертной информации. Для вычисления весовых коэффициентов предложено использовать метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати [7]. Этот метод имеет значительное практическое применение, но для многокритериальной задачи выбора сценария развития перевозочного процесса используется впервые.

4) Многокритериальный выбор сводится к однокритериальной задаче выбора, когда с использованием весовых коэффициентов производится «свертка» множества нормированных показателей по выбранной модели в обобщенный критерий. Возможные модели «свертки» нормированных целевых показателей будут приведены ниже.

5) Предпочтительным сценарием развития перевозочного процесса для конкретной модели «свертки» нормированных показателей является сценарий, у которого обобщенный критерий имеет наименьшее значение. Дополнительно определяется итоговый предпочтительный сценарий развития по множеству «сверток» нормированных показателей.

Модель вычисления нормированных целевых показателей, характеризующих перевозочный процесс, базируется на метрике «близости» экспертно созданных сценариев развития к «наилучшему» сценарию.

Нормированные целевые показатели образуют матрицу $D = (d_{ij})$, $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$; где d_{ij} – значение i -го нормированного целевого показателя для j -го сценария развития перевозочного процесса.

Если i -й нормированный целевой показатель минимизируется, то

$$d_{ij} = (y_{ij} - y_{i0}) / y_{i0}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J. \quad (12)$$

Если i -й нормированный целевой показатель максимизируется, то

$$d_{ij} = (y_{i0} - y_{ij}) / y_{i0}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J. \quad (13)$$

В формулах (12) и (13) y_{i0} , $i = 1, \dots, I$ – значения целевых показателей для «наилучшего» сценария развития перевозочного процесса (Y_0).

На следующем этапе процедуры вычисляются значения обобщенных критериев по различным моделям «свертки». В работе отобраны и использованы три модели «свертки» для вычисления обобщенных критериев (E_{kj} , $k = 1, 2, 3$):

1) аддитивная (линейная) модель, когда

$$E_{1j} = \sum_{i=1}^I w_i d_{ij}, \quad \sum_{i=1}^I w_i = 1, \quad j = 1, \dots, J, \quad (14)$$

2) мультипликативная (производственная) модель, когда

$$E_{2j} = \prod_{i=1}^I d_{ij}^{w_i}, \quad \sum_{i=1}^I w_i = 1, \quad j = 1, \dots, J; \quad (15)$$

3) нелинейная модель, когда

$$E_{3j} = \max_i w_i d_{ij}, \sum_{i=1}^J w_i = 1, j = 1, \dots, J. \quad (16)$$

В моделях (14) – (16) w_i – весовые коэффициенты, учитывающие важность целевых показателей.

Для каждой модели «свертки» определяется предпочтительный сценарий развития. При этом используется следующее правило: предпочтительным является сценарий развития перевозочного процесса, у которого обобщенный критерий (14) – (16) имеет минимальное значение

$$S_{jp}(k) = \arg[\min_j(E_{kj})], k = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Здесь jp_k ($k = 1, 2, 3$) – номер предпочтительного сценария развития для k -й модели «свертки», $jp_k \in (1, 2, \dots, J)$.

Завершается вычислительный алгоритм определением итогового предпочтительного сценария развития, который вычисляется по множеству моделей «свертки». В этом случае первоначально необходимо найти значения «взвешенного» обобщенного критерия по множеству моделей «свертки»

$$E_j = \sum_{k=1}^{K_0} q_k E_{kj}, \sum_{k=1}^{K_0} q_k = 1, j = 1, \dots, J, \quad (18)$$

где K_0 – число моделей «свертки»; q_k – коэффициент важности для k -й модели «свертки». Эти коэффициенты предлагается определять, используя метод анализа иерархий.

Итоговым предпочтительным сценарием развития перевозочного процесса является сценарий с минимальным значением критерия (17)

$$S_{jp} = \arg[\min_j(E_j)]. \quad (19)$$

Здесь jp – номер итогового предпочтительного сценария развития перевозочного процесса, $jp \in (1, 2, \dots, J)$.

Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса проверена по исходным данным РЦКУ ВСЖД, которые приведены в таблице 1: Y – целевые показатели (результат процедуры понижения размерности): PR – операционная прибыль (3); R_0 – операционный риск (5); R_I – риск по показателю рентабельности инвестиций (7); pl – производительность локомотива; pg – средний вес грузового поезда; S_1, S_2, S_3 – варианты сценариев развития; S_0 – «наилучший» сценарий; YM – цель показателя (максимизация или минимизация); W – весовые коэффициенты для целевых показателей.

Таблица 1 – Исходные данные для определения предпочтительных сценариев развития перевозочного процесса

Y	S_1	S_2	S_3	S_0	YM	W
PR	3,25	3,05	3,35	3,55	Max	0,302
R_0	0,275	0,305	0,265	0,250	Min	0,172
R_I	0,265	0,250	0,215	0,200	Min	0,167
pl	2215	2332	2410	2500	Max	0,109
pg	3835	3508	4256	4500	Max	0,250

В таблице 2 приведены полученные значения нормированных целевых показателей (12), (13) по трем сценариям.

На основе значений, приведенных в таблице 2, по моделям (14) – (16) получены значения объединенных критериев (таблица 3) по всем трем сценариям, дополнительно найдены значения «взвешенного» обобщенного критерия (17). Весовые коэффициенты по моделям «свертки» таковы: 0,364; 0,252; 0,384.

Таблица 2 – Значения нормированных целевых показателей

<i>D</i>	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃
<i>PR</i>	0,0845	0,1408	0,0563
<i>R</i> ₀	0,100	0,220	0,060
<i>R</i> ₁	0,325	0,250	0,075
<i>pl</i>	0,114	0,067	0,036
<i>pg</i>	0,1478	0,2204	0,0542

Таблица 3 – Значения обобщенных критериев

<i>E</i>	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	<i>S</i> ₃
<i>E</i> _{1j}	0,1464	0,1846	0,0573
<i>E</i> _{2j}	0,1294	0,1729	0,0563
<i>E</i> _{3j}	0,0543	0,0551	0,0170
<i>E</i> _j	0,1201	0,1039	0,0502

По значениям обобщенных критериев (см. таблицу 3) найдены предпочтительные сценарии развития перевозочного процесса, соответствующие исходным данным для расчета (см. таблицу 1):

- а) независимо от модели «свертки» предпочтительным является третий сценарий;
- б) итоговым является также третий сценарий перевозочного процесса.

Проведенные исследования показывают, что, создавая и используя экспертно-статистическую информацию, можно количественно оценивать показатели различных сценариев развития перевозочного процесса, тем самым способствуя повышению эффективности принятия управленческих решений. Можно утверждать, что проведенные формализация, постановка и реализация многокритериальной задачи выбора предпочтительного сценария, основанные на обработке экспертно-статистической информации, позволяют прогнозировать результаты развития выбранных сценариев до натурального эксперимента.

Список литературы

1. Морозов, В. Н. К новой структуре управления [Текст] / В. Н. Морозов // Пульт управления // Гудок. – 2011. – № 1. – С. 5 – 9.
2. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений [Текст] / И. Г. Черноруцкий. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
3. Домбровский, И. А. Вероятностный анализ безубыточности грузовых перевозок на основе метода Монте-Карло [Текст] / И. А. Домбровский, Ю. М. Краковский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 1 (13). – С. 125 – 130.
4. Краковский, Ю. М. Исследование влияния неопределенности исходных данных на показатели пассажирских перевозок [Текст] / Ю. М. Краковский, Д. И. Жарий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2011. – №1. – С. 96 – 101.
5. Каргапольцев, С. К. Алгоритмическое обеспечение оценки целевых показателей перевозочного процесса перевозок [Текст] / С. К. Каргапольцев, В. А. Начигин, В. Ф. Фролов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – №1. – С. 144 – 149.
6. Петровский, А. Б. Многокритериальное ранжирование объектов по противоречивым данным [Текст] / А. Б. Петровский // Искусственный интеллект / Ин-т проблем искусственного интеллекта. – Донецк. – 2006. – № 2. – С. 215 – 220.
7. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

Статья рассматривает возможный подход к построению модели оценки влияния человека на функционирование человеко-машинных систем. Формализация процедур по анализу влияния человека в системе «человек – машина – среда» для их дальнейшей интеграции в систему управления рисками, внедряемую в настоящее время в ОАО «РЖД», позволит повысить качество оценки и анализа рисков и, соответственно, обеспечить требуемый уровень безопасности на железнодорожном транспорте.

Учет человеческого фактора является неотъемлемой частью проектирования, создания и эксплуатации машин и технических систем, необходимым условием повышения производительности труда и качества продукции. Рассмотрение деятельности человека в системе «человек – машина – среда» (ЧМС) (рисунок 1) позволяет точнее конкретизировать участие и роль человека в нежелательных событиях, возникающих в процессе функционирования ЧМС.

Основательное развитие работ, посвященных исследованию человеко-машинных систем в нашей стране, началось со середины прошлого века, когда началось осуществление перехода к комплексным системам автоматизации технологических процессов. На этой стадии выяснилось, что при автоматизации управления рационально часть работ оставлять человеку-оператору. Исследованию и формализации операторских функций человека в человеко-машинных системах посвящены работы А. И. Губинского, Е. Б. Цоя, М. А. Котика, Г. В. Дружинина и многих других ученых [1 – 3]. Стоит отметить, что в большинстве научных исследований центральным звеном в системе ЧМС является связь «человек – машина». Оптимальная организация данного взаимодействия обеспечивает эффективность функционирования всей системы ЧМС. При этом в большей степени рассматривались физиологические характеристики человека с реализацией его возможностей как оператора сложной автоматизированной системы.

В авиации для представления взаимодействия между различными компонентами авиационной системы используется разработанная профессором Элвином Эдвардсом модель SHELL (рисунок 2) [4, 5], которая по своей сути является аналогом ЧМС. Изначальная концептуальность данных моделей не предполагала дальнейшей их формализации, но реализация такой возможности помогает углубить исследование влияния человеческого фактора в ЧМС.

В данной модели совпадающие или несовпадающие границы блоков (интерфейсы) так же важны, как и характеристики самих блоков. Несовпадение границ может быть источником ошибок.

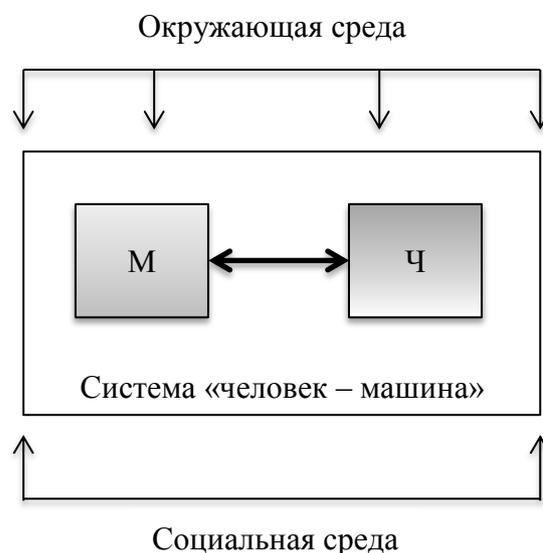


Рисунок 1 – Система «человек – машина – среда»

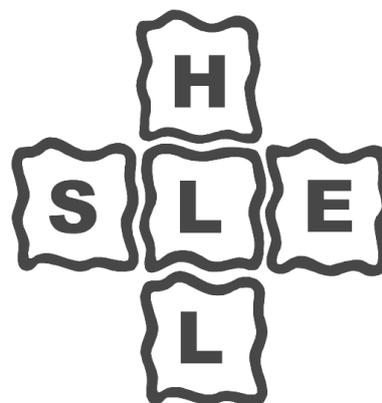


Рисунок 2 – Модель «SHELL»: S – установка (процедуры, символы и т. д.); H – объект (машина); E – среда; L – субъект (человек)

Организация производства на транспорте

В центре модели SHELL находится субъект (человек) как наиболее критический и гибкий компонент, а остальные компоненты модели должны быть соответствующим образом согласованы с этой центральной частью модели.

Анализ причин нарушения безопасности движения поездов и производственного травматизма, проведенный на основании анализа состояния безопасности движения на железных дорогах ОАО «РЖД» в 2012 г. и анализа состояния условий и охраны труда в ОАО «РЖД» за 2012 г., показывает, что основной причиной данных происшествий на железнодорожном транспорте является нарушение человеком технологии производства работ. Это выражено как в непосредственном нарушении технологического процесса, так и в нарушении трудовой и производственной дисциплины, неприменении средств индивидуальной защиты, использовании неисправного оборудования, машин, механизмов и т. п. Таким образом, технология должна являться ключевым звеном модели оценки влияния человека на функционирование человеко-машинной системы с учетом взаимосвязей и закономерностей вышеобозначенных моделей (рисунок 3).

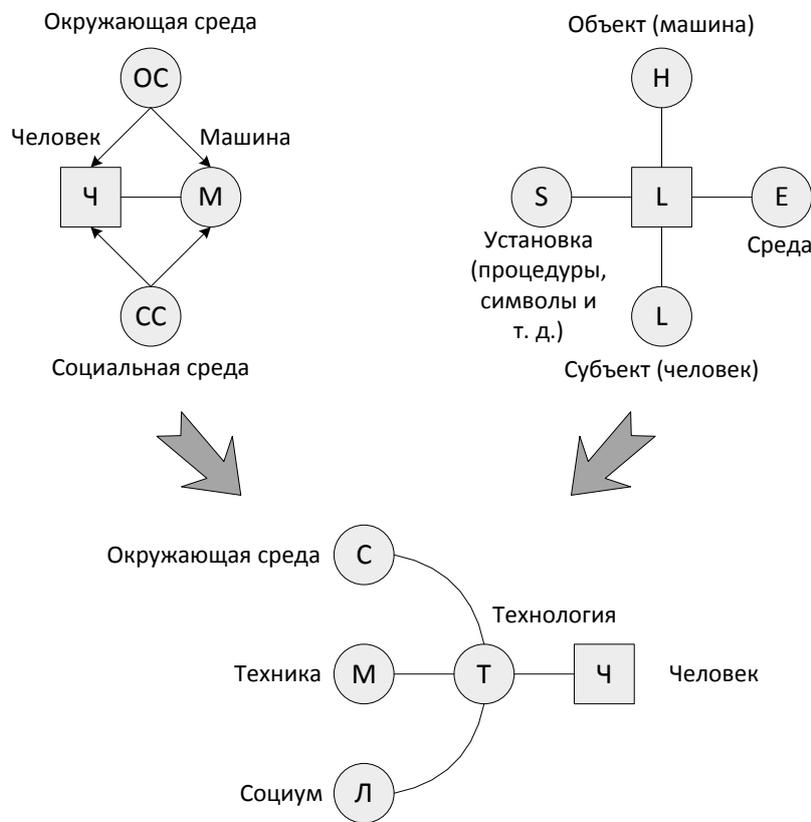


Рисунок 3 – Формирование модели оценки «человеческого фактора»

Формализацию данной модели можно реализовать с применением теории графов. Для представленной модели матрица смежности изображена на рисунке 4.

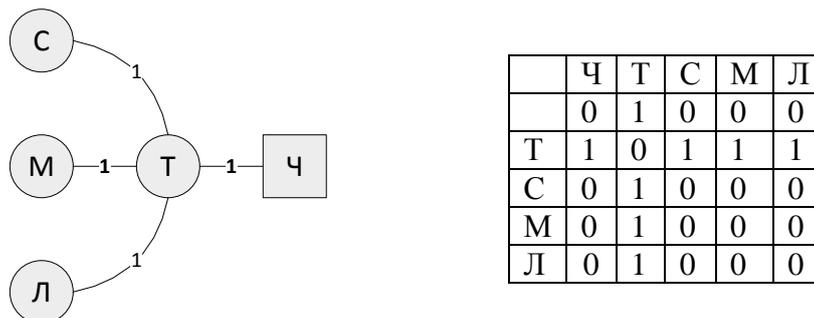


Рисунок 4 – Матрица смежности модели

Представленная на рисунке 4 модель отражает идеальный сценарий, когда работник идеально выполняет все требования технологического процесса. Тогда происходящие нежелательные события будут вызваны причинами, не связанными с ошибочными действиями человека, реализующего технологический процесс. К таким причинам будут относиться как непосредственно несовершенство технологического процесса, так и конструктивные недостатки, несовершенство, ненадежность машин, механизмов, подвижного состава, воздействие природных факторов, противоправные вмешательства и т. д. Как показывает ежегодно проводимый на железнодорожном транспорте анализ, происшествий, вызванных данными причинами, происходит в разы меньше, чем происшествий, вызванных причинами, связанными с ошибочными действиями человека. Поэтому более точной является модель, представленная на рисунке 5 в виде взвешенного графа и его матрицы смежности.

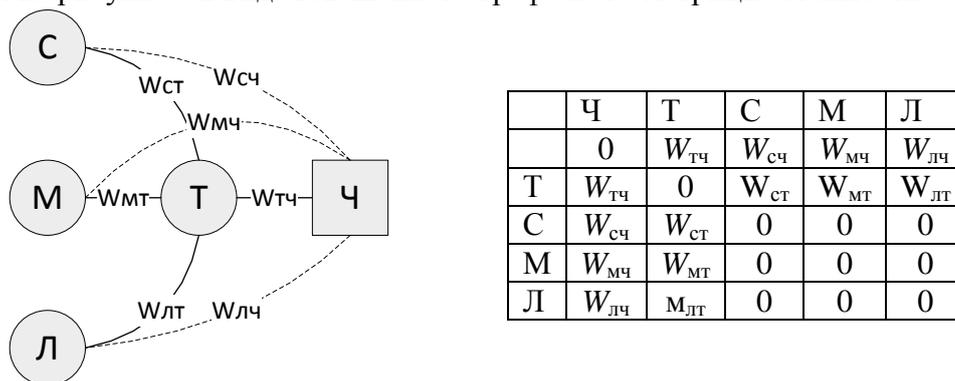


Рисунок 5 – Взвешенный граф модели оценки влияния человеческого фактора

Здесь появившиеся связи (ребра графа) с весами $W_{Сч}$, $W_{Мч}$, $W_{Лч}$ обусловлены нарушениями работником технологии производства работ. Так, например, весовой коэффициент $W_{Сч}$ определяет нарушения, связанные с неприменением средств индивидуальной и коллективной защиты и т. п.; $W_{Мч}$ – применение неисправного оборудования, машин, механизмов и т.п.; $W_{Лч}$ связан с неудовлетворительной организацией производства работ и т. п.

Значения весовых коэффициентов $W_{ij} \in \{0, 1\}$ для конкретной профессии определяются на основе статистических данных по расследованиям произошедших нежелательных событий.

Уточняя данную модель в части раскрытия факторов, определяющих вершины графа (так, человека характеризуют антропометрические, физиологические, психологические, психосоциальные и другие факторы), можно расширить возможности учета влияния человеческого фактора в части более глубокого анализа причинно-следственных связей, обуславливающих ошибочные действия человека, которые в конечном итоге приводят к нарушению безопасности движения и производственному травматизму.

Интеграция данного подхода в систему управления рисками [6, 7], активно внедряемую на железнодорожном транспорте, позволит на основе результатов такого анализа производить формирование адресных корректирующих действий, направленных на обеспечение правильности и точности выполнения технологического процесса, что даст возможность существенно снизить вероятность наступления нежелательных событий, вызванных человеческим фактором в ходе реализации технологических процессов.

Список литературы

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник [Текст] / А. Н. Адаменко, А. Г. Ашерев и др.; Под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
2. Котик, М. А. Природа ошибок человека-оператора [Текст] / М. А. Котик, А. М. Емельянов. – М.: Транспорт, 1993. – 252 с.

3. Дружинин, Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий [Текст] / Г. В. Дружинин / МАИК «Наука/Интерпериодика». – М., 2000. – 327 с.
4. Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по проведению проверок безопасности полетов [Текст] / Междунар. организация гражданской авиации (ИКАО). – Монреаль, Канада, 2002. – 224 с.
5. Роль человеческого фактора в обеспечении безопасности производственных процессов на транспорте [Текст] / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов и др. // Восточноукраинский нац. ун-т им. В. Даля / Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганск. – 2013. – № 18 (207). – Ч. 2. – С.151 – 155.
6. Аксенов, В. А. Совершенствование системы управления рисками для решения задач по обеспечению безопасности производственных процессов [Текст] / В. А. Аксенов, Д. Л. Раенок, А. М. Завьялов // Надежность. – М. – 2013. – № 3 (46). – С. 103 – 111.
7. Аксенов, В. А. Пути повышения эффективности содержания объектов инфраструктуры железных дорог [Текст] / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 2 (14). – С. 113 – 117.

УДК 621.333:621.314.26:621.313.33:621.317

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ДВУХЗВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Авилов Валерий Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Литвинов Артем Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

Приведена методика определения потерь в основных элементах двухзвенных преобразователей частоты (выпрямителе и инверторе), которая позволяет дополнить математическую модель процесса испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки и использовать ее при проектировании испытательных станций, в том числе для расчета мощности станции, потребляемой из сети. Практической ценностью данной методики является отсутствие необходимости использования приборов для измерения мощности переменного тока с частотой, отличной от 50 Гц.

Ключевые слова: методика, потери, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, испытания, метод взаимной нагрузки.

METHODOLOGY FOR ASSIGNING LOSSES IN TWO-ELEMENT FREQUENCY CONVERTER IN INDUCTION MOTOR TEST RIG

Avilov Valery Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Litvinov Artyom Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of the department «Electrical machinery and general electrical», OSTU.

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

The article contains methodology for assigning losses in two-element frequency converter (in rectifier and dc-ac converter). which allow to replenish mathematical model of back to back rig test method for induction motors and to use it in design induction motor rig test, also for calculation electrical power test rig which consumed from electrical network. Practical value of the methodology is no need in using electrical measurement instrument for ac-dc power with frequency different from 50 Gz.

Keywords: *methodology, losses, frequency converter, induction motor, testing, back-to-back method.*

УДК 621.436

РАСЧЕТ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРИ СГОРАНИИ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЕ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Анисимов Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

Золотовский Михаил Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Студент ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

В статье представлена методика расчета отношения теплоемкостей рабочего тела, образовавшегося в процессе сгорания топлива. Представлены аналитические зависимости отношения теплоемкостей в зависимости от температуры продуктов сгорания, коэффициента избытка воздуха и доли сгоревшего топлива для различных составов смесевых видов углеводородного топлива.

Ключевые слова: *дизельное топливо, теплоемкость, альтернативная добавка, рабочий цикл, дизельный двигатель.*

THE CALCULATION OF HEAT CAPACITY WORKING RELATIONSHIP DURING THE COMBUSTION OF MIXED TYPES OF FUEL IN THE CYLINDER OF A DIESEL LOCOMOTIVE ENGINES

Anisimov Alexandr Cergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

Zolotovskiy Mikhail Urevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Student of OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

The article presents the method of calculation of heat capacity working relations in the process of fuel combustion. Analytical dependence of heat capacity ratio are presented depending on the temperature of products of combustion, excess air ratio and proportion of burnt fuel for different formulations of mixed types of hydrocarbon fuel.

Keywords: *diesel fuel, heat capacity, alternative supplement, duty cycle, diesel engine.*

УДК 621.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО И ТЕРМОРАДИАЦИОННОГО МЕТОДОВ КАПСУЛИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПРИ РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дульский Евгений Юрьевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Аспирант, ассистент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Доценко Наталия Сергеевна
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-902-578-77-16.
E-mail: semejkina2010@yandex.ru

Лыткина Екатерина Михайловна
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-66.
E-mail: Forevochka@bk.ru

Статья посвящена исследованию эффективности использования терморadiaционного и конвективного методов сушки изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава, пропитанной различными современными лаками и компаундами, при их депоовском и заводском ремонте. Объективными факторами при сравнении методов являются такие параметры, как класс нагревостойкости, электрическая прочность и цементирую-

щая способность. Авторами обосновывается преимущество терморadiaционного метода перед конвективным.

Ключевые слова: *электрические машины тягового подвижного состава, изоляция, сушка, терморadiaционный, конвективный, электрическая прочность, цементирующая способность.*

RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF CONVECTION AND METHODS THERMORADIATIVE CAPSULATING WINDING INSULATION FOR REPAIR OF ELECTRIC MACHINES TPN

Dulsky Evgeny Urievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Post-graduate student, assistant of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8-983-403-46-43.

E-mail: E.Dulskiy @ mail.ru

Dotsenko Natalia Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Post-graduate student, assistant of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8-902-578-77-16.

E-mail: semejkina2010@yandex.ru

Lytkina Ekaterina Mikhailovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8 (3952) 63-83-66.

E-mail: Forevochka@bk.ru

The article studies comparing the effectiveness of using thermoradiation and convective drying methods insulation windings of electrical machines of traction rolling stock, impregnated with various modern varnishes and compounds at their factory and depot repair. Objective factors in the comparison methods are parameters such as temperature class, electric strength and cementing capacity. The author substantiates advantage thermoradiation method over convective.

Keywords: *electric machines of traction rolling stock, insulation, drying, thermoradiation, convection, electric strength, cementing ability.*

УДК 531.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МАТЕРИАЛА КОЛЕСА В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ ЛОКОМОТИВА

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

Капустьян Михаил Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

Ярышева Лилия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теория механизмов и детали машин», ОмГУПС.

Телефон: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

В статье представлены результаты математического моделирования процесса нагрева материала колеса в режиме торможения локомотива. Полученные результаты могут быть использованы при расчете изменения температуры для любой точки колеса в процессе всего режима торможения.

Ключевые слова: *моделирование, колесная пара, торможение локомотива, тормозная колодка, температурное поле.*

MODELING OF HEATING MATERIAL OF THE WHEEL IN BRAKING MODE OF LOCOMOTIVE

Kuznetsov Viktor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812)31-18-11

Kapustyan Mikhail Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-11.

E-mail: mcap731@gmail.com

Yarysheva Lilia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-18.

E-mail: tmdm@omgups.ru

The results of mathematical modeling of the heating process of the wheel material during braking mode of the locomotive are presented in article. The results can be used to calculate the temperature change for any point of the wheel during the braking operation.

Keywords: *modeling, wheels, braking mode of the locomotive, brake shoes, temperature field.*

УДК 621.33

ОСНОВЫ ЛОКАЛЬНОГО МЕТОДА ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Лыткина Екатерина Михайловна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-66.

E-mail: Forevochka@bk.ru

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Аспирант, ассистент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-983-403-46-43.

E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

Худоногов Анатолий Михайлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: 8-914-88-14-675.

E-mail: hudonogov@irgups.ru

Основным повреждаемым узлом тяговых электрических машин тягового подвижного состава является изоляция в области основания лобовой части. Неисправная система изоляции в торцевой части лобовых обмоток приводит к влажности. Причиной неудовлетворительной надежности является также повышенная напряженность в этой зоне. В качестве мероприятий, разработанных для продления ресурса электрических машин, авторами предлагается система локального капсулирования изоляции энергией ИК-излучения.

Ключевые слова: *тяговый электрический двигатель, изоляция, ИК-излучатель, нагрев, сушка, ресурс, надежность.*

BASIS OF LOCAL LIFE EXTENSION METHOD INSULATION OF ELECTRIC MACHINES OF LOCOMOTIVES THERMAL RADIATION

Lytkina Ekaterina Mikhailovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.

Phone: 8 (3952) 63-83-66.
E-mail: Forevochka@bk.ru

Dulsky Evgeny Urievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Post-graduate student, assistant of the department «Electrorolling composition», ISTU.
Phone: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy @ mail.ru

Hudonogov Anatoly Mikhailovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr.Sci.Tech., professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.
Phone: 8-914-88-14-675.
E-mail: hudonogov@irgups.ru

The main damaged knot of traction electric motors of a traction rolling stock is isolation, namely in the field of the basis of front part. The imperfect system of isolation in face part of front windings results in humidity. Also the increased intensity in this zone is the reason of low reliability. Authors propose the system of local insulation encapsulation energy of infrared radiation as life extension activities of electrical machines.

Keywords: *drive electric motor, insulation, IR-emitter, heating, drying, resource, reliability.*

УДК 621.316.97

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХ ОДНОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

Медведева Анна Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: 8-923-673-68-15.

E-mail: maa1024@yandex.ru

Слептерева Надежда Константиновна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

В статье приводится решение системы уравнений для расчета тока и напряжения трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния.

Ключевые слова: *взаимные влияния, первичные параметры, вторичные параметры, напряжение, ток.*

DISTRIBUTION OF CURRENT AND VOLTAGE IN THE THREE SINGLE-WIRE LINES TAKING INTO ACCOUNT THEIR MUTUAL INFLUENCE

Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., teacher of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

Medvedeva Anna Alecsandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

Phone: 8-923-673-68-15.

E-mail: maa1024@yandex.ru

Sleptereva Nadezhda Konstantinovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of the department « Information and communication systems and information security », OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

The article provides a solution to the system of equations for the voltages and currents of three single-wire lines with regard to their inductive and galvanic influence.

Keywords: *mutual influences, primary parameters, secondary parameters, voltage, current.*

УДК 629.424.14.004:621.436

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА РАЗНЫХ СОРТАХ ТОПЛИВА

Ведрученко Виктор Родионович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Крайнов Василий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Выполнен теоретический анализ движения жидкого топлива в линии низкого давления (ЛНД) систем топливоподачи дизельных двигателей. Предложено использовать для расчетов ЛНД систему уравнений для гомогенной смеси (по С. С. Кутателадзе). Показано, что при использовании в тепловозных и судовых дизелях альтернативных видов топлива необходима перерегулировка топливной аппаратуры, а в качестве диагностического параметра целесообразно оперировать степенью неравномерности рабочего процесса.

Ключевые слова: *топливо, альтернативные виды топлива, дизель, горение.*

UNEVENNESS OF WORKING PROCESS AND FUEL SUPPLY AS DIAGNOSTIC INDICATORS OF DIESEL ENGINES WORKING ON DIFFERENT FUEL GRADES**Vedruchenko Viktor Rodionovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: VedruchenkoVR@omgups.ru

Krajnov Vasily Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Power system», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: KrainovVV@omgups.ru

Theoretical analyze of liquid fuel movement in low-pressure line (LPL) of diesel fuel supply systems is implemented. To solve LPL the equations set of homogeneous blend is suggested. It is shown that when using alternative fuels in locomotive and ship diesels the retrimming of fuel equipment is required, and it's reasonable to use the degree of irregularity of working process as diagnostic indicator.

Keywords: *fuel, alternative fuels, diesel engine, burning.*

УДК 621.331:621.311

АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**Вильгельм Александр Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, инженер научно-производственной лаборатории «Энерго-сберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Гутников Вячеслав Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энерго-сберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

В статье описаны общие принципы создания расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения, а также способы апробации полученной модели с целью установления степени ее адекватности.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, имитационное моделирование, рекуперативное торможение.

APPROBATION OF SETTLEMENT MODEL OF SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY OF THE RAILROADS OF THE DIRECT CURRENT FOR THE ASSESSMENT OF POTENTIAL OF ENERGY EFFICIENCY OF RECUPERATIVE BRAKING

Vilgelm Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the engineer of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Gutnikov Vyacheslav Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The senior researcher of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

Nikiforov Michail Michajlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the chief of research-and-production laboratory «Power-saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

The article describes the general principles of the computational model of the traction power supply DC Railway to assess the potential energy recuperative braking, as well as ways of approximation the resulting model to determine its adequacy.

Keywords: system of traction power supply, electrorolling stock, imitating modeling, recuperative braking.

УДК 621.336.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСТОГО КОНТАКТА МЕЖДУ КОНТАКТНЫМ
ПРОВОДОМ И ТОКОСЪЕМНОЙ ПЛАСТИНОЙ В СТАТИКЕ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Паранин Александр Викторович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: alks84@mail.ru

Ефимов Александр Васильевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: Aefimov@usurt.ru

Ефимов Денис Александрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 6б.

Преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: d.e.2@yandex.ru

В статье предложена конечно-элементная модель работы электрического контакта между контактными проводом и токосъемной пластиной токоприемника, учитывающая сложную взаимосвязь электрических и тепловых процессов. Исследовались контактные пары, состоящие из изношенного контактного провода МФ-100 и токосъемных пластин из металлокерамики ВЖЗП или графита. Микрогеометрия поверхности тел в месте контакта получена на основе модели Гринвуда – Вильямсона. Было рассмотрено два крайних воз-

возможных случая соприкосновения контактного провода с пластиной. Результаты были проанализированы и сравнены с известными опытными данными. Рассчитано, при каких соотношениях контактного нажатия и тока из-за выгорания контактов возникнет искровой или дуговой разряд. Определены пути совершенствования модели.

Ключевые слова: *контактный провод, токосъемная пластина, электрический контакт, микрошероховатость, контактные пятна, модель Гринвуда – Вильямсона, конечный элемент, граничные условия, теплопроводность, температура, электрический потенциал, удельная электропроводность, контактное напряжение, контактное сопротивление, контактная плотность тока, испарение и плавление металла, дуговой и искровой разряд.*

MODELING CLEAN CONTACT BETWEEN THE CONTACT WIRES AND COLLECTOR STRIP WITH STATIC FINITE ELEMENT METHODS

Paranin Alexander Viktoroivch

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Ekaterinburg 620034, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Electric power supply of transport», USURT.

Phone: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: alks84@mail.ru

Efimov Alexander Vasilievich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Ekaterinburg 620034, Russia.

Ph. D., the professor of the department «Electric power supply of transport», USURT.

Phone: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: Aefimov@usurt.ru

Efimov Denis Alexandrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorov st., Ekaterinburg 620034, Russia.

The tutor of the department «Electric power supply of transport», USURT.

Phone: 8 (343) 221-24-78.

E-mail: d.e.2@yandex.ru

In the article the finite element model of the electrical contact pin wire – collector strip, which takes into account the complex interaction of electric and thermal processes. As the contact wire is selected worn MF-100, the current collection plate – two brands VJZ-metal and graphite. Microgeometry the body surface at the contact point is obtained based on the model of Greenwood – Williamson. It was considered the two extreme cases of possible contact between the contact wire to the plate. The results were analyzed and compared with the known experimental data. Calculated at what proportions contact force and contact current due to burnout occurs spark or arc. Identify ways to improve the model.

Keywords: *contact wire, the current collection plate, electric contact, micro-roughness, the contact spots, Greenwood – Williamson model, finite element, boundary conditions, thermal conductivity, temperature, electric potential, electrical conductivity, surface pressure, the contact resistance, contact current density, evaporation and melting metal arc and spark.*

УДК 004.021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМУМА КОЛИЧЕСТВА ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОЛИНОМА ПРИ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ СКОРОСТИ И КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛОКОМОТИВА

Грицутенко Станислав Семенович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», руководитель отдела «Нанотехнологии», ОмГУПС.

Тел.: 8-960-983-38-11.

E-mail: st256@mail.ru

В статье определяется минимум количества операций, которые необходимо произвести для вычисления обычного полинома. Результаты исследования оформлены в виде доказательства одной леммы и одной теоремы.

Ключевые слова: *быстрые алгоритмы, полином, цифровая обработка сигналов, вычислимость.*

THE THEOREM ABOUT A MINIMUM OF NUMBER OF OPERATIONS FOR A POLYNOMIAL CALCULATION DURING OF EXTRAPOLATION OF VELOCITY AND COORDINATES OF A MOVING LOCOMOTIVE

Gritsutenko Stanislav Semenovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department « Information and communication systems and information security », the chief of research-and-production laboratory «Nanotechnology», OSTU.

Phone: 8-960-983-38-11.

E-mail: st256@mail.ru

The minimum of number of operations for a polynomial calculation is found. Results are presented as proofs of one lemma and one theorem.

Keywords: *fast algorithms, polynomial, digital signal processing, computability*

УДК 621.396.6

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Митрохин Валерий Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Ряполов Артем Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Инженер кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

E-mail: a.v.ryapolov@gmail.com

Гаранин Александр Евгеньевич

Красноярский институт железнодорожного транспорта (КрИЖТ).

660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кецховели, 89.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», КрИЖТ.

Тел.: (391) 248-46-67.

E-mail: alexandergaranin@mail.ru

В статье рассмотрена методика расчета экранирующих оболочек радиоэлектронной аппаратуры. Проведено исследование однослойных и многослойных экранов, состоящих из алюминия, меди и стали. Выполнено моделирование воздействия импульсного электромагнитного поля на экран из проводящего материала с использованием метода конечных разностей во временной области. Приведены временные зависимости сопротивления экранов. Представлены примеры картины распределения электромагнитного поля в окружающем экран пространстве. Приведены примеры временных зависимостей электрического поля на внешней и внутренней границах экрана, наглядно показывающие ослабление импульсного электромагнитного поля.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсные электромагнитные поля, экранирование, метод конечных разностей во временной области, рекуррентная свертка.

SHIELDING EFFECTIVENESS CALCULATION METHOD FOR THE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT IN CASE OF PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD IMPACT

Mitrokhin Valery Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Communication systems and information safety», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Ryapolov Artem Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Engineer of the department «Communication systems and information safety», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-94.

E-mail: a.v.ryapolov@gmail.com

Garanin Alexander Evgenievich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (KrIRT).

89, Lado Ketshoveli st., Krasnoyarsk, 660028, Russia.

Ph. D, associate professor of the department «Railway Traffic Support Systems», KrIRT.

Phone: (391) 248-46-67.

E-mail: alexandergaranin@mail.ru

In this article a shielding effectiveness calculation method for the radio electronic equipment is considered. Monolayer and multilayer shields made with aluminum, cuprum, steel is investigated. Interaction of pulse magnetic field and conductive shield is simulated using finite difference time domain method. Frequency and time dependencies for the shield impedances are shown. Also pictures of electromagnetic field distribution near shielding are presented. Time dependencies of electric field on the shield external and internal borders are shown.

Keywords: electromagnetic compatibility, pulse electromagnetic field, shielding, finite difference time domain method, recursive convolution.

УДК 624.19.035.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ВРЕМЕННОЙ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ В РАСЧЕТАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Геология, основания и фундаменты», СГУПС.

Тел.: +7-383-328-0455.

E-mail: lanisal@stu.ru

Цибариус Юрий Александрович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.

Научный сотрудник лаборатории «Геология, основания и фундаменты», СГУПС.

Тел.: +7-983-323-2181.

E-mail: yustu@yandex.ru

Одним из наиболее распространенных видов временной крепи при строительстве транспортных тоннелей является набрызгбетонная крепь. В настоящее время учет набрызгбетонной крепи в расчетах конструкций постоянных обделок затруднителен в связи с отсутствием универсальной методики проектирования, что влечет за собой увеличение материалоемкости конструкций и трудоемкости производимых работ. Данные о степени и характере влияния основных механических характеристик скальных грунтов и геометрических размеров сооружения на значение коэффициента учета податливой временной набрызгбетонной крепи, полученные в результате проведенных исследований, послужили основой для дальнейшей разработки универсальной методики проектирования.

В ходе теоретических исследований установлены эмпирические зависимости распределения напряжений между временной набрызгбетонной крепью и постоянной монолитной железобетонной обделкой. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния временной набрызгбетонной крепи и постоянной обделки, проведенных в натуре-

ных условиях, подтвердили возможность применения полученных в ходе теоретических исследований эмпирических зависимостей при расчете конструкций постоянных обделок тоннелей с учетом временной набрызгбетонной крепи. Использование предложенных зависимостей при проектировании конструкций обделок позволит значительно снизить материало- и трудоемкость строительства транспортных тоннелей.

Ключевые слова: набрызгбетон, тоннелестроение, временная крепь, численное моделирование, постоянная обделка, скальные грунты, натурные наблюдения, напряженное состояние.

IMPROVED METHOD OF CALCULATION TENSITY OF PERMANENT TUNNEL LINING WITH TEMPORARY SHOTCRETE LINING FACTOR

Tsibarius Yury Alexandrovich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.

Research scientist of laboratory «Geology, basis and foundations», STU.

Phone: +7-983-323-2181.

E-mail: yustu@yandex.ru

Lanis Aleksey Leonidovich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.

Ph. D., associate professor, head of laboratory «Geology, basis and foundations», STU.

Phone: +7-383-328-0455.

E-mail: lanisal@stu.ru

Shotcrete lining is one of the most common types of temporary supports in tunnel construction. The influence of shotcrete lining on design calculations of permanent lining is difficult, because there is no method of designing at the present time. This leads to increasing in consumption of materials and labour of construction. The information about the influence of the basic mechanical properties of soils, geometrical size of construction per value of temporary shotcrete lining factor was obtained during research. These data formed the basis for futher development method of designing.

Empirical correlations of stress distribution between temporary shotcrete lining and permanent monolithic reinforced concrete lining were obtained during theoretical research. Results of experimental research tensity of temporary shotcrete and permanent lining confirmed the possibility of using in the designing this empirical correlations. Using in the designing proposed empirical correlations will leads to reduction in consumption of materials and labour of construction.

Keywords: shotcrete, tunnel construction, temporary support, numerical modeling, permanent lining, rock, field observations, tensity.

УДК 656.073.7

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОБОРОТА ПОРТОВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Ахмедов Руслан Равшанович

Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС).

190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9.
Аспирант кафедры «Железнодорожные станции и узлы», ПГУПС.
E-mail: cherniu@rambler.ru

В статье рассматриваются особенности транспортной сети портов Балтийского моря, проблемы ее оптимизации с целью увеличения грузооборота и отражения вызовов, связанных с модернизацией транспортного комплекса России.

Ключевые слова: *оптимизация грузооборота, транспортная сеть портов, портовая инфраструктура.*

THE RESEARCH OF THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF THE FREIGHT TURNOVER IN PORTS OF THE BALTIC SEA IN THE CONDITIONS OF MODERNIZATION OF THE TRANSPORT COMPLEX

Akhmedov Ruslan Ravshanovich

Petersburg State Transport University (PSTU).
9, Moscow av., Sankt-Peterburg, 190031, Russia.
Post-graduate student of the department « Railway stations and junctions », PSTU.
E-mail: cherniu@rambler.ru

The article considers the peculiarities of the transport network ports on the Baltic sea, the problems of optimization is to increase cargo turnover and the challenges associated with the modernization of the transport complex of Russia

Keywords: *optimization of cargo turnover, transport network ports, port infrastructure.*

УДК 656.33:65.011.56

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИЗАВОДСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

Либерман Яков Львович

Уральский федеральный университет (УрФУ).
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлообрабатывающие станки и комплексы», УрФУ.
Тел.: (343) 347-17-45
E-mail: Yakov_Liberman@List.ru

Горбунова Любовь Николаевна

Сибирский федеральный университет (СФУ).
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности», СФУ.
Тел.: (391) 249-72-06.
E-mail: S-Vasilev1@yandex.ru

В статье рассматриваются проблема обеспечения точности позиционирования транспортирующих машин (железнодорожных кранов, мотовозов, электровозов и др.), перемещающихся по рельсовому пути на внутризаводском промышленном транспорте.

Для улучшения точности системы автоматизированного позиционирования, ориентированной на применение на внутризаводском рельсовом железнодорожном транспорте, предложено техническое решение, защищенное патентом РФ.

Ключевые слова: *машина, дальномеры, расстояние.*

CAS OF KEEPING OF INSIDE FACTORY CLAOOTYPE TRANSPORT

Lieberman Yakov Lvovich

Ural Federal University (UFU).

19, Mira av., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Mechanical machines and systems», UFU.

Phone: (343) 347-17-45.

E-mail: Yakov_Lieberman@List.ru

Gorbunova Lubov Nikolaevna

Siberian Federal University (SFU).

79, World pr., Krasnoyrsk, 660041, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Engineering Ecology and Life», SFU.

Phone: (391) 249-72-06.

E-mail: S-Vasilev1@yandex.ru

On an inside factory industrial transport different transporting machines (railway faucets, mотовозы, electric locomotives and other), moving on a claootype way, are used. For realization of the required manipulation loads the transporting machines indicated higher must be stopped at one or another points (positions) of claootype way with high enough exactness, that is provided with a help.

The analysis of existent control system rotined that they provided exactness of keeping of transporting machines not always. For the increase of exactness of the system of the automated keeping, oriented to application on an inside factory claootype railway transport technical solution, protected patent of Russian Federation.

Keywords: *track machines, EDM distance.*

УДК 656.259.12:621.372.5: 517.54

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ КООРДИНАТЫ ПОДВИЖНОЙ ЕДИНИЦЫ НА ПУТИ

Лунев Сергей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

Сероштанов Сергей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: SeroshtanovSS@omgups.ru

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

Ходкевич Антон Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: HodkevichAG@omgups.ru

В статье рассматриваются вопросы определения координаты подвижного состава на участке железнодорожного пути. Предложено и обосновано применение математического аппарата конформных отображений.

Ключевые слова: *рельсовая линия, координата подвижной единицы, конформное отображение.*

APPLICATION OF THE APPARATUS OF CONFORMAL MAPPINGS FOR CONTINUOUS MONITORING COORDINATES ROLLING STOCK ON THE RAILWAY

Lunev Sergey Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

Seroshtanov Sergey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: SeroshtanovSS@omgups.ru

Sokolov Maxim Mihaylovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the teacher of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

Hodkevich Anton Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: 8 (3812) 31-18-72.

E-mail: HodkevichAG@omgups.ru

This paper deals with the determination of the coordinates of the rolling stock for the railway station. Proposed and justified the use of mathematical tools of conformal mappings.

Keywords: *rail line, the coordinate rolling stock, conformal mapping.*

УДК 629.4.027

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Минжасаров Марат Хайргельдаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

В статье приведен краткий теоретический анализ особенностей железнодорожных экипажей с нелинейными упругими элементами. Рассмотрены отличительные черты рессорного подвешивания электровозов старого и новых поколений. На основе отличий построена расчетная схема и выведена математическая модель вертикальной динамики условного «одноосного» электровоза нового поколения, позволяющая оценить критическую скорость железнодорожного экипажа и показатели его динамических качеств.

Ключевые слова: *нелинейные упругие элементы, рессорное подвешивание электровозов, математическая модель колебаний, передаточные функции.*

BRIEF ANALYSIS OF RAILWAY VEHICLE WITH NONLINEAR ELASTIC ELEMENTS

Minzhasarov Marat Khairgeldaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Post-graduate student of the department «Theoretical mechanics», OSTU

Phone: (3812) 31-16-88.

The article provides a brief theoretical analysis of railway vehicle with nonlinear elastic elements. Considered distinctive features of spring suspension electric locomotives of the old and the new generations. On the basis of differences of a calculation scheme and derived a mathematical model of vertical dynamics of conditional «uniaxial» electric locomotive of new generation allows to estimate the critical speed train crew and indicators of its dynamic qualities.

Keywords: *nonlinear elastic elements, spring suspension electric locomotives, the mathematical model of oscillations, transfer functions.*

УДК 519.6:311

ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Фролов Василий Федорович

Восточно-Сибирская железная дорога (ВСЖД).

664005, г. Иркутск, ул. Маяковского, 25.

Соискатель, ИрГУПС.

Тел.: +7-902-171-53-47.

E-mail: nacho@yandex.ru

Начигин Владимир Александрович

Восточно-Сибирская железная дорога (ВСЖД).

664005, г. Иркутск, ул. Маяковского, 25.

Кандидат технических наук, начальник технологической службы, ВСЖД.

Тел.: +7-902-171-53-47.

E-mail: nacho@yandex.ru

Предложены формализация и постановка многокритериальной задачи выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса железнодорожным транспортом на региональном уровне, учитывающей, что этот процесс является сложной системой, функционирующей в условиях многовариантности и неопределенности.

Ключевые слова: *перевозочный процесс, компьютерное моделирование, многокритериальная задача выбора, теория принятия решений.*

PREFERRED SELECTION PROCEDURE SCENARIO DEVELOPMENT TRANSPORTATION PROCESS

Frolov Vasilii Fedorovich

East-Siberian Railway (ESRR).

25, st. Mayakovsky, Irkutsk, 664005, Russia.

Competitor, ISTU.

Phone: +7-902-171-53-47.

E-mail: nacho@yandex.ru

Nachigin Vladimir Alexandrovich

East-Siberian Railway (ESRR).

25, st. Mayakovsky, Irkutsk, 664005, Russia.

Ph.D., chief of technological service, ESRR.

Phone: +7-902-171-53-47.

E-mail: nacho@yandex.ru

The formalization of the problem and formulation of multicriteria select a preferred development scenario rail transportation process at the regional level, taking into account that this process is a complex system operating in a multi-variant conditions and uncertainties.

Keywords: *transportation process, computer simulation, multicriteria problem of choice, decision making theory.*

УДК 658.5

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

Аксенов Владимир Алексеевич

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», МИИТ.

Завьялов Антон Михайлович

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь», заместитель начальника отдела информатизации Российской открытой академии транспорта, МИИТ.

Тел.: +7 (495) 799-95-17.

E-mail: zavant@gmail.com

Статья рассматривает возможный подход к построению модели оценки влияния человека на функционирование человеко-машинных систем. Формализация процедур по анализу влияния человека в системе «человек – машина – среда» для их дальнейшей интеграции в систему управления рисками, внедряемую в настоящее время в ОАО «РЖД», позволит повысить качество оценки и анализа рисков и, соответственно, обеспечить требуемый уровень безопасности на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: *человеческий фактор, человеко-машинные системы, управление рисками.*

THE MODEL OF EVALUATION OF HUMAN RIGHTS IN THE OPERATION OF MAN-MACHINE SYSTEMS

Aksenov Vladimir Alekseevich

Moscow State Transport University (MSURE).

9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor, head of the departament «Technosphere Safety», MSURE.

Zavyalov Anton Mikhailovich

Moscow State Transport University (MSURE).

9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Railway automation, telemechanics nickname and communication», the deputy head of the department of information ROAP MSURE.

Phone: +7 (495) 799-95-17.

E-mail: zavant@gmail.com

The article examines a possible approach to the construction of evaluation model of human influence on the functioning of human-machine systems. Formalization of procedures for the analysis of human influence in the «man – machine – environment» for their further integration into the risk management system is being implemented at JSC «Russian Railways» will improve the quality assessment and risk analysis, and, accordingly, to ensure the required level of security in rail transport.

Keywords: *human factor, man-machine systems, risk management.*

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию предоставляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в 2 экз., а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc; название статьи, аннотация, ключевые слова, название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках); сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавита, математические символы такие, например, как \cos , \sin , \max , \min , – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные 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.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
2. Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
3. Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, ОмГТУ (Омск);
4. Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
5. Демин Юрий Васильевич – д.т.н., профессор, НГАВТ (Новосибирск);
6. Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., доцент, ВНИИЖТ (Москва);
7. Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
8. Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, ИПЦ «Динамика» (Омск);
9. Кузнецов Андрей Альбертович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
10. Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
11. Медведев Владимир Ильич – д.т.н., профессор, СГУПС (Новосибирск);
12. Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
13. Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск);
14. Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
15. Николаев Виктор Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
16. Рауба Александр Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
17. Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск);
18. Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
19. Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
20. Сквородников Евгений Иванович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
21. Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
22. Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск);
23. Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., профессор, ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 24.03.2014.

Тираж 500 экз.

EDITORIAL BOARD

1. Borodin Anatoly Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
2. Vedruchenko Viktor Rodionovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
3. Gorjunov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, OmSTU (Omsk);
4. Gonchar Igor Ivanovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
5. Demin Yury Vasilyevich – D. Sc., professor, NSAWT (Novosibirsk);
6. Ermolenko Dmitry Vladimirovich – D. Sc., associate professor, JSC «VNIIZhT» (Moscow);
7. Kandaev Vasily Andreevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
8. Kostjukov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, SPC «The dynamics» (Omsk);
9. Kuznetsov Andrey Albertovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
10. Lebedev Vitaly Matveevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
11. Medvedev Vladimir Ilyich – D. Sc., professor, SSTU (Novosibirsk);
12. Mitrokhin Valery Evgenyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
13. Mochalin Sergey Mikhailovich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk);
14. Nekhaev Viktor Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
15. Nikolaev Viktor Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
16. Rauba Alexander Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
17. Safronov Edward Alexeevich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk);
18. Sidorov Oleg Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
19. Sidorova Elena Anatolyevna – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
20. Skovorodnikov Evgeny Ivanovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
21. Kharlamov Viktor Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
22. Chetvergov Vitaly Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk);
23. Shpaltakov Vladimir Petrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).

