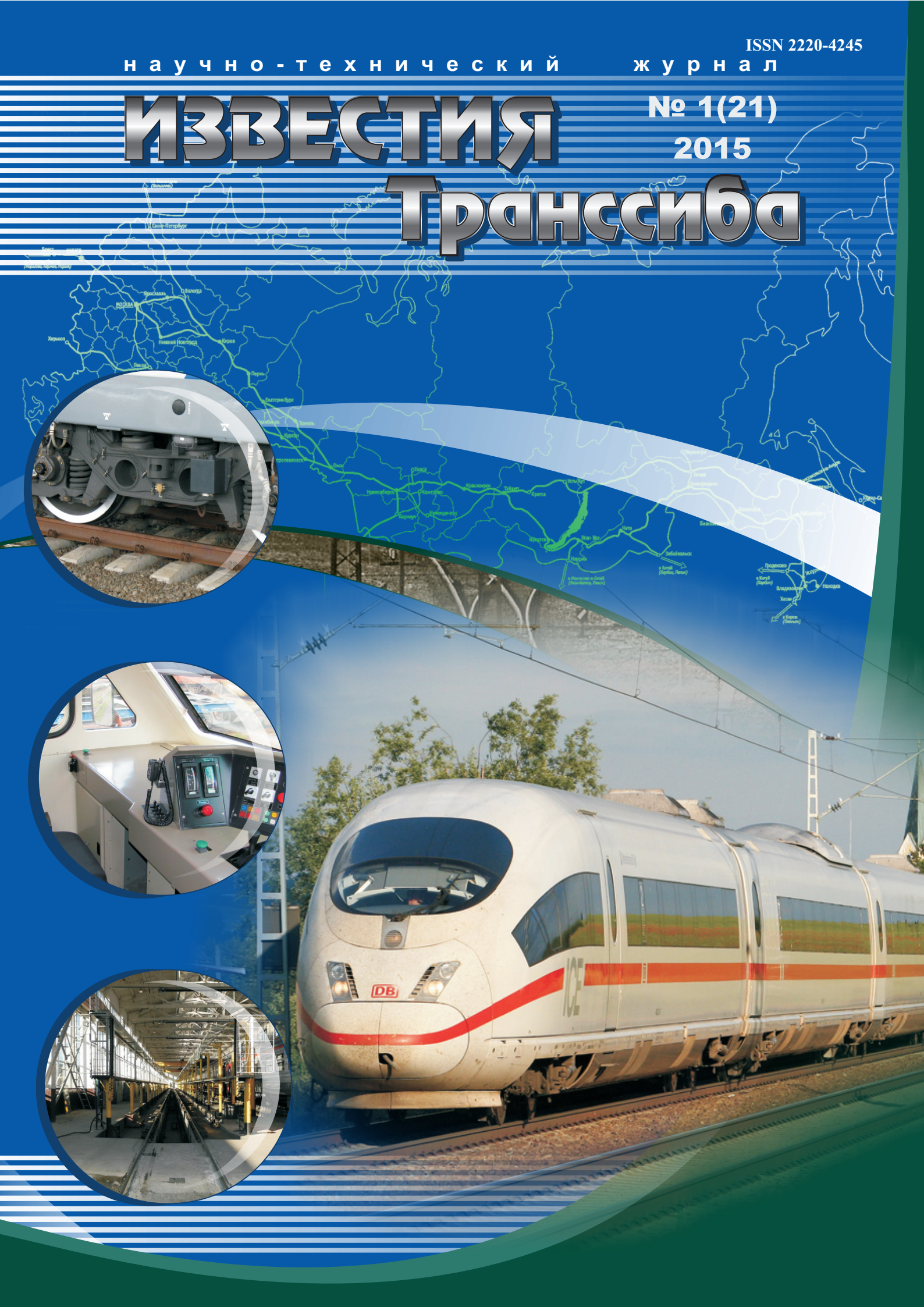
ISSN 2220-4245

научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 1(21)
2015



ИЗВЕСТИЯ Транссиба

научно-технический журнал

№ 1(21)
2015

Периодичность - 4 выпуска в год

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПСа, 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 СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского университета (Катовицы, Польша).
9. Каргапольцев Сергей Константинович – проректор по научной работе ИрГУПСа, 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 ОмГТУ, 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 – директор института транспортного строительства ДВГУПСа, 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. Kargapoltcev 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 – professsor, engineer of Brno University of Technology (Brno, Czech republic).
14. Serenko Andrey Fedorovich – director of Institute transport construction 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

Анисимов А. С. Расчет состава продуктов сгорания топлива в цилиндре тепловозного дизеля, работающего по газодизельному циклу 2
Дульский Е. Ю., Лыткина Е. М., Худоногов А. М. Влияние химических свойств полимеров и режимов ИК-энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава 6
Кондратенко Е. В. Построение математической модели процесса истечения газа сквозь малые отверстия в теле котла железнодорожной цистерны 11
Лакин И. К., Аболмасов А. А., Мельников В. А. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов 20
Михеев В. А. Обобщенная оценка технического состояния функциональных подсистем энергетической установки тепловоза 29
Нехаев В. А., Николаев В. А., Челтыгмашев Е. П. Обоснование выбора расчетной схемы железнодорожного экипажа для оценки импульсного воздействия со стороны пути 36
Обрывалин А. В., Кваскова Н. А. Продление срока службы вагонных колес, поступающих в ремонт с дефектами термомеханического происхождения 44
Файзибаев Ш. С., Хромова Г. А., Махамадалиева М. А. Численные исследования тепловых контактных процессов в гидрофрикционном гасителе колебаний для высокоскоростного электроподвижного состава 49

Транспортная энергетика

Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Кротенко Е. А. Исследование электростатического поля на гирляндах изоляторов контактной сети 54
Незевак В. Л., Шатохин А. П., Гателюк О. В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения 59
Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии 69

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Зачатейский Н. Д., Аржанников А. А., Альтман Е. А. Совершенствование метода «выделения фона» для нахождения подвижных объектов на железнодорожном переезде с помощью компьютерного зрения 74
Сулавко А. Е., Еременко А. В., Левитская Е. А. Разграничение доступа к информации на основе скрытого мониторинга пользователей компьютерных систем: портрет нелояльного сотрудника 80
Шахов В. Г., Морозов А. В., Тиунов А. П., Громов А. Н. Игровые и топологические модели информационной безопасности 89

Путь и искусственные сооружения

Аксенов В. А., Матафонов А. В., Ильиных А. С. Имитационная модель формирования требуемых параметров качества поверхности при шлифовании рельсов 95

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Белов А. А., Ларин А. Н. Оценка эксплуатационных характеристик транспортного узла . 102

Организация производства на транспорте

Евсеев Д. Г., Мелихов А. В. Оценка качества ремонта пассажирских вагонов 112

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 629.424.001.57

А. С. Анисимов

РАСЧЕТ СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ

В статье представлена методика расчета количества продуктов сгорания дизельного и газодизельного топлива, модельные расчеты выполнены применительно к тепловозному дизелю 16ЧН26/26 (2А-5Д49). Параметры рабочего цикла дизеля, работающего на различных видах углеводородного топлива, рассчитаны с использованием комбинации методов Гриневецкого – Мазинга и Вибе. Расчет количества вредных выбросов и количества парниковых газов выполнен с использованием метода равновесного состава с учетом изменения термодинамических параметров выгорания топлива и элементарного состава топливной смеси по позициям контроллера машиниста.

Количество продуктов сгорания топлива в цилиндре двигателя при определенной цикловой подаче зависит от скорости окисления составляющих топлива кислородом воздуха, протекающего при переменных значениях объема цилиндра, давления и температуры рабочего тела в камере сгорания.

Качественный и количественный состав продуктов сгорания определяется с использованием термодинамических методов, позволяющих оценить равновесный состав продуктов сгорания для любых заданных условий выгорания топлива (элементарный химический состав топлива, состав рабочего тела, изменение температуры, объема и давления рабочего тела в процессе сгорания) с учетом энергии диссоциации составляющих элементов рабочего тела. Метод равновесного состава для расчета количества продуктов сгорания углеводородных видов топлива в цилиндре двигателей внутреннего сгорания предложен в работе [1]. Данный метод использован кафедрой «Локомотивы» ОмГУПСа для расчета качественного и количественного состава продуктов сгорания с учетом особенностей конструкции тепловозных дизелей, расширения видов и теплофизических характеристик современных видов топлива, повышения требований по снижению антропогенного воздействия двигателей на окружающую среду. Основные положения усовершенствованной методики представлены в работах [2, 3].

В общем случае, согласно работе [4], в составе отработавших газов при сгорании дизельного топлива состава H + C + O + S = 1 может содержаться 36 элементов, которые представляют собой химические соединения из пяти исходных элементов: углерода, водорода, серы, кислорода и азота.

Для определения количества этих элементов в методе равновесного состава используются четыре уравнения материального баланса и уравнение Дальтона, записанные в виде:

$$S_{\mathrm{S}} / S_{\mathrm{C}} = 0,3746\mathrm{S/C}; \tag{1}$$

$$S_{\mathrm{C}} / S_{\mathrm{H}} = 0,0839\mathrm{C/H}; \tag{2}$$

$$\alpha S_{\mathrm{C}} / S_{\mathrm{O}} = 0,1678\mathrm{C} / \left(0,3356\mathrm{C} + \mathrm{H}\right); \tag{3}$$

$$S_{\mathrm{O}} / S_{\mathrm{N}} = 1,1082\left(0,21 + \mathrm{O}\right); \tag{4}$$

$$P_j = \sum_{i=1}^{n} P_{ij}, \tag{5}$$

где S_O, S_N, S_C, S_H, S_S – число атомов кислорода, азота, углерода, водорода и серы в определенный момент процесса сгорания; α – коэффициент избытка воздуха; P_j – полное давление смеси в цилиндре двигателя для j-го момента сгорания; P_{ij} – парциальное давление i-го элемента газа для j-го момента сгорания; n – количество элементов в продуктах сгорания топлива.

Значения парциального давления продуктов сгорания определяются по известной температуре сгорания с использованием констант равновесия реакций диссоциации газов, рассчитанных по выражению [4]:

$$\log K_{ij} = K_0 + K' \ln X + K_{-2} X^{-2} + K_{-1} X^{-1} + K_1 X + K_2 X^2 + \\ + K_3 X^3 + K_4 X^4 + K_5 X^5 + K_6 X^6 + K_7 X^7, \quad (6)$$

где $X = T_j/10000$ – средняя температура рабочего тела для j-го момента сгорания топлива, К.

Коэффициенты K_0, K', K_{-2}, …, K_7 в уравнении (6) для анализируемых продуктов сгорания приведены в работе [4].

Решение уравнений (1) – (5) выполняется с использованием численных методов, с заданной точностью. Подробная методика решения системы уравнений и определения количества продуктов сгорания представлена в работе [2].

Изменение параметров рабочего тела (объема, давления, температуры, доли сгоревшего топлива и коэффициента избытка воздуха) в цилиндре двигателя для расчетного интервала времени $j_{i-1} - j_i$ происходит вследствие выделения тепла при сгорании топлива, теплообмена рабочего тела со стенками цилиндра, газового обмена между объемом цилиндра и впускной и выпускной системами, изменения состава рабочего тела и т. д.

Известно, что в цилиндре двигателя топливо сгорает не полностью даже при наиболее благоприятных условиях, причиной чего может быть значительное количество факторов, например:

а) неоднородность рабочей смеси в объеме камеры сгорания при подготовке топлива к сгоранию, наличие локальных зон с недостаточным количеством кислорода;

б) малые значения термодинамических параметров рабочего тела, величина которых определяется в основном техническим состоянием дизеля.

В связи с этим методика корректировки количества продуктов сгорания базируется на известной величине доли сгоревшего топлива, которая для идеальных условий может быть принята равной 0,999 [5]. Согласно элементарному составу топлива в продуктах сгорания корректируется количество углерода (сажи), кислорода, водорода и серы.

Реализация метода равновесного состава возможна при известных эмпирических или теоретических зависимостях $\alpha = f(\varphi)$, $T = f(\varphi)$, $p = f(\varphi)$, $V = f(\varphi)$, построенных для всего процесса выгорания топлива. Данные зависимости определяются в результате моделирования рабочего цикла дизеля комбинацией методов Гриневецкого – Мазинга и Вибе [2, 3, 5].

В свою очередь изменение элементарного состава топлива приведет к изменению уравнений равновесия (1) – (5) и к изменению термодинамических параметров процесса выгорания топливной смеси, необходимых для расчета продуктов сгорания различных видов топлива.

Согласно методу Вибе давление и температуру рабочего тела в цилиндре дизеля при выгорании топлива рассчитывают для каждого угла поворота коленчатого вала, полагая, что параметры конца сгорания для i-го угла поворота коленчатого вала соответствуют параметрам начала сгорания для $i + 1$ угла.

Горючим телом в цилиндре дизеля является смесь какого-либо вида топлива и избыточного кислорода воздуха. Величина коэффициента избытка воздуха в цилиндре дизеля определяется с учетом плотности рабочего тела в конце процесса наполнения, начале процесса сжатия и количества воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания единицы используемого вида топлива. Очевидно, что коэффициенты избытка воздуха в цилиндре двигателя при работе на традиционном дизельном топливе и смесевом топливе будут различны по причине отличия газовой постоянной и теоретически необходимого количества воздуха для сгорания единицы топлива.

С мспользованием алгоритмов и комплекса программных средств, разработанных на кафедре «Локомотивы» ОмГУПСа, выполнен расчет термодинамических параметров рабочего

цикла дизеля для различных позиций контроллера машиниста тепловоза и для различных видов топлива.

Для устранения ошибок, которые могут иметь место при использовании численных методов при оценке термодинамических параметров рабочего цикла дизеля, полученные данные аппроксимированы методом наименьших квадратов и зависимости максимального давления сгорания (P_z, МПа), максимальной температуры сгорания (T_z, К) и коэффициента избытка воздуха (α) от величины среднего эффективного давления рабочего цикла дизеля (P_e, МПа), например, для смеси дизельного топлива и природного газа

$$P_z = 2{,}28P_e^2 + 0{,}133P_e + 4{,}44; \quad (7)$$

$$T_z = -767{,}43P_e^2 + 2176{,}52P_e + 595; \quad (8)$$

$$\alpha = 5{,}41P_e^2 - 13{,}63P_e + 9{,}42\,. \quad (9)$$

Существенного отклонения в величине параметров выгорания дизельного топлива, а также дизельного топлива в смеси с различными видами газовых добавок в цилиндре дизеля практически не наблюдается. Так, максимальное отклонение коэффициента избытка воздуха и отклонение давления сгорания не превышают 0,9 % и 10,7 % соответственно, а отклонение температуры сгорания – не более 2,15 %. Поэтому полученные результаты теплового расчета и рассчитанный элементарный состав топлива позволили применить метод равновесного состава для расчета продуктов сгорания в цилиндре дизеля для различных смесевых видов топлива.

Графики изменения количества продуктов сгорания топливных смесей в отработавших газах дизеля по позициям контроллера машиниста тепловоза 2ТЭ70 представлена на рисунке 1.

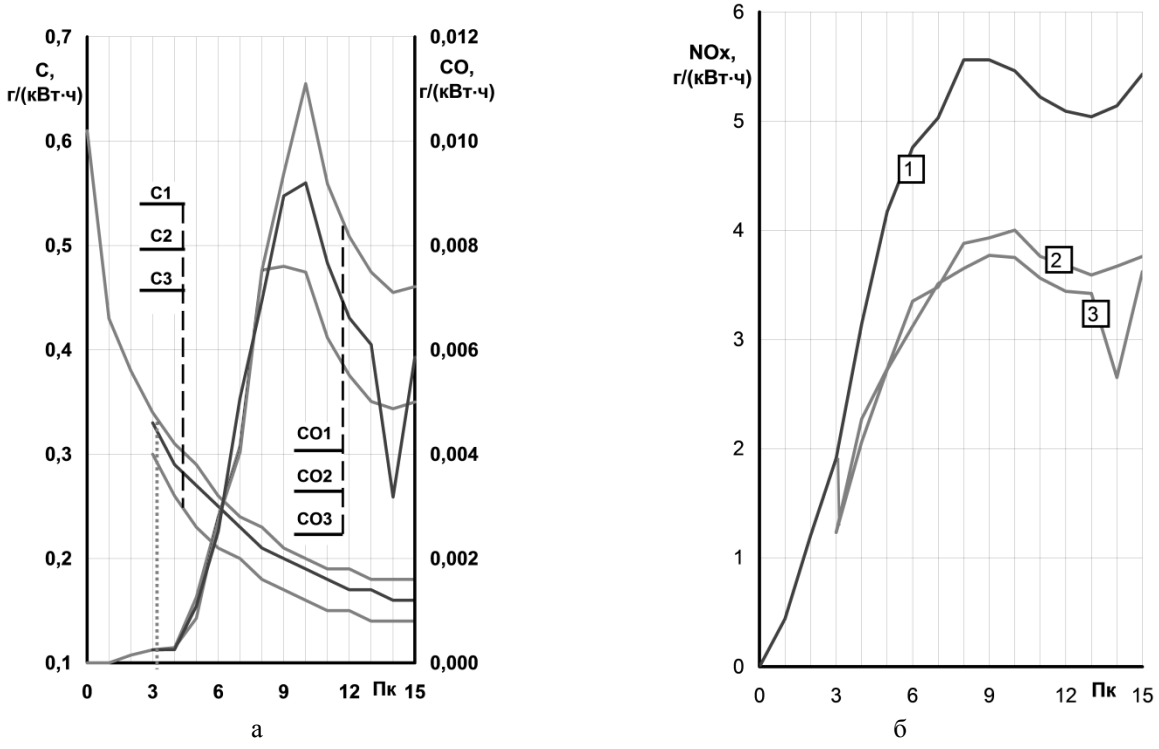


Рисунок 1 – Графики изменения количества сажи (С), оксида углерода (СО) (а) и оксидов азота (NO_X) (б) в отработавших газах дизеля 2А-5Д49, работающего на смесевых видах топлива: 1 – дизельное топливо; 2 – смесь дизельного топлива и природного газа (CH_4); 3 – смесь дизельного топлива и бутан-пропановой смеси (50 % C_4H_{10} + 50 % C_3H_8)

Очевидно, что доля сгоревшего топлива для каждого режима работы дизеля может быть различна, но в рамках поставленной задачи этим различием можно пренебречь и допустить, что на каждой позиции контроллера машиниста и для каждого вида топлива выгорает 99,9 %. Тогда 0,1 % несгоревшего топлива будет определять количество углерода (сажи) в продуктах сгорания, и в настоящей работе это количество скорректировано с учетом часового расхода топлива дизелем на позиции контроллера машиниста и его элементарного состава.

На основании приведенных зависимостей (см. рисунок 1) можно заключить, что применение в дизельных двигателях смеси жидкого дизельного и газового топлива, будь то природный газ или бутан-пропановая смесь, позволит значительно снизить удельное количество сажи в отработавших газах практически во всем диапазоне нагрузок и уменьшить удельное количество оксида углерода при работе дизеля на средних и высоких нагрузках, что, несомненно, будет способствовать большей полноте выгорания углерода топлива.

На рисунке 2 представлено распределение количества продуктов полного сгорания различных углеводородных видах топлива дизеля 2А-5Д49 по позициям контроллера машиниста тепловоза. Согласно приведенным зависимостям можно утверждать, что применение природного газа или бутан-пропана при реализации газодизельного цикла в дизельных двигателях приведет к снижению удельного количества диоксида углерода (CO_2), но в то же время увеличит удельное количество водяных паров (H_2O) в отработавших газах.

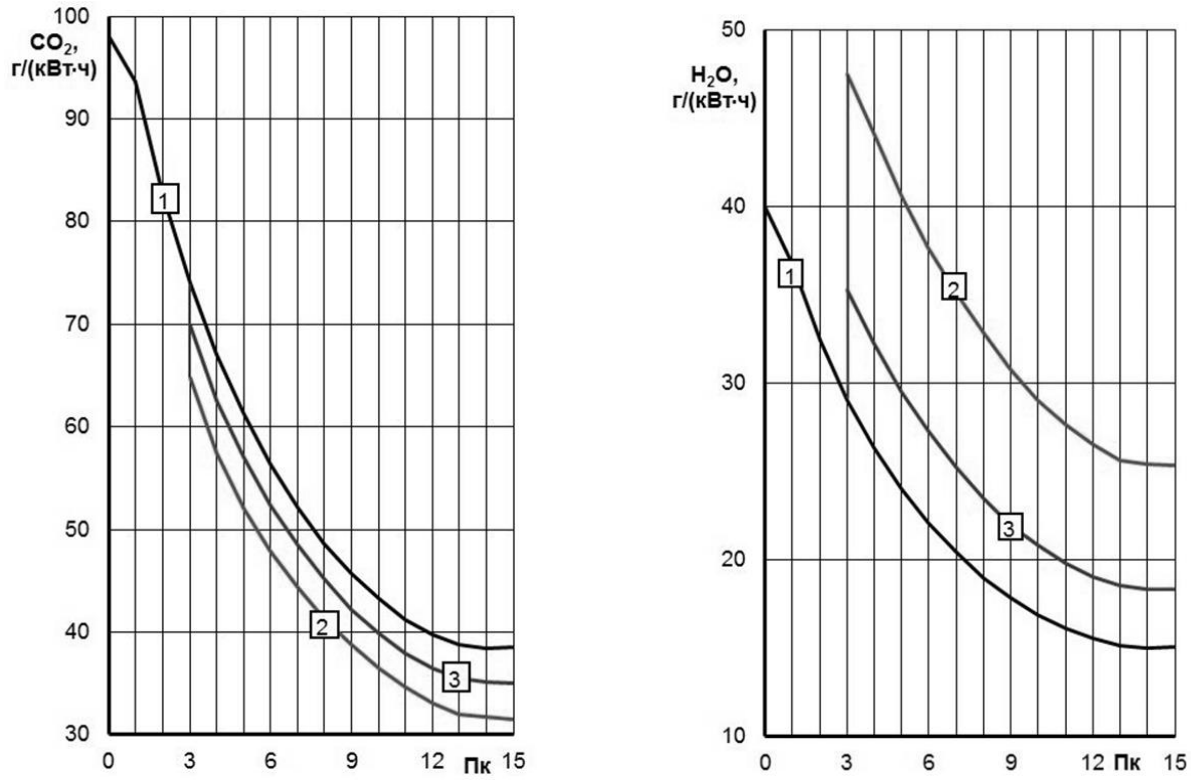


Рисунок 2 – Количество диоксида углерода (а) и водяных паров (б) в отработавших газах дизеля 2А-5Д49, работающего на смесевых видах топлива: 1 – дизельное топливо; 2 – дизельное топливо и бутан-пропановая смесь (50 % C_4H_{10} + 50 % C_3H_8); 3 – дизельное топливо и природный газ (CH_4)

Оценивая эффективность конвертирования тепловозных дизелей для работы по газодизельному циклу на базе выполненных теоретических расчетов, опираясь на опыт создания газодизельных двигателей, необходимо отметить, что использование сжатого природного или сжиженного нефтяного газа в качестве топлива для дизельных двигателей приведет к снижению количества продуктов неполного сгорания топлива, что существенно улучшит экономические характеристики дизелей тепловозов. Это особенно важно, если на территори-

ях локомотивных депо имеются пути отстоя тепловозов, на которых в зимнее время осуществляется прогрев тепловозов на какой-либо позиции контроллера машиниста.

Список литературы

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

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

3. Володин, А. И. Комплексный анализ термодинамических, экономических и экологических характеристик тепловозных дизелей в условиях эксплуатации: Монография [Текст] / А. И. Володин, Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – 166 с.

4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст] / Под ред. Л. В. Гурвича. – М.: Наука, 1962. – 1480 с.

5. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей [Текст] / И. И. Вибе. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 271 с.

References

1. Zvonov V. A. Toxicity of internal combustion engines [*Toksichnost′ dvigateley vnutrennego sgoranija*] / Moscow, Mashinostroenie, 1981. 159 p.

2. Volodin A. I. Methods of evaluation of technical condition, operational efficiency and environmental safety of diesel locomotives [*Metody ocenki tehnicheskogo sostojanija,j ekspluatacionnoj jekonomichnosti i jekologicheskoj bezopasnosti dizel′nyh lokomotivov*]. Moscow: Zheldorizdat, 2007. 264 p.

3. Volodin A. I., Skovorodnikov E. I., Anisimov A. S. Comprehensive analysis of thermodynamic, economic and environmental performance of diesel locomotive engines in operation [*Kompleksnyj analiz termodinamicheskih, jekonomicheskih i jekologicheskih harakteristik teplovoznyh dizelej v uslovijah jekspluatacii*] Omsk State Transport University. Omsk, 2011. 166 p.

4. Gurvich L. V. Thermodynamic properties of individual substances [*Termodinamicheskie svojstva individualnyh veshchestv*]. Moscow, Science, 1962. 1480 p.

5. Vibe I. I. New on cycle engines [*Novoe o rabochem cikle dvigatelej*]. Sverdlovsk, Mashgiz, 1962. 271 p.

УДК 621.33

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

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И РЕЖИМОВ ИК-ЭНЕРГОПОДВОДА НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

С целью продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава была предложена технология восстановления изоляции с использованием энергии инфракрасного излучения, позволившая повысить качество изоляции по показателям пробивного напряжения и твердости. Статья посвящена анализу и оценке экспериментальных исследований, проводимых в двух различных значимых работах по данному направлению. Представлен анализ данных работ в плане отличительных особенностей и выводов по результатам экспери-

ментальных исследований. По результатам анализа сформулирована новая гипотеза о необходимости учета при капсулировании изоляции и ее упругости. Также заданы новые направления для дальнейших исследований.

Основным наиболее уязвимым, дорогим и повреждаемым узлом электрических машин тягового подвижного состава является изоляция их обмоток. В процессе ремонтных операций в деповских и заводских условиях изоляцию электрических машин тягового подвижного состава восстанавливают с помощью пропитки в лаке или компаунде с последующей сушкой. В результате данных операций на поверхности изоляции образуется полимерная капсула, которая способствует дальнейшей безотказной эксплуатации электрических машин в тяжелых условиях. Штатные способы сушки изоляции, которые используются в настоящее время при деповском ремонте электрических машин тягового подвижного состава и основанные на применении конвективного способа, не обеспечивают в должной мере необходимого качества образованной полимерной капсулы.

С целью продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава была предложена технология восстановления изоляции с использованием энергии инфракрасного (ИК) излучения [1]. В соответствии с гипотезой, рассматриваемой в работах [1, 3, 4], надежность и долговечность полимерной изоляции в основном определяется показателями ее прочности и пластичности.

При эксплуатации электрических машин тягового подвижного состава, в условиях Севера, Сибири и Дальнего Востока показатели их надежности и долговечности значительно ниже по сравнению с другими регионами. Причем очень часто повреждение изоляции происходит в локальных частях обмотки, например, на лобовых частях электрических машин.

Как известно, механическая прочность отражает свойства материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под действием внешних сил. Электрическая прочность отражает свойства диэлектрика сопротивляться разрушению (электрическому пробою) под действием внешнего и внутреннего электрического поля. Пластичность – способность материала получать остаточные деформации без разрушения и сохранять их после снятия нагрузки. Оптимизация прочности и пластичности полимерной изоляции во многом будет зависеть от химического состава полимера (пропиточного материала), спектрального состава и режимов ИК-энергоподвода в процессе создания полимерной капсулы в локальных технологиях продления ресурса электрических машин.

Проблемой разрушения материалов, и в частности полимеров, занимались многие выдающиеся ученые, и по этой проблеме существует обширная литература, которая представлена в работе А. А. Валишина [2]. Основное внимание Валишин А. А. уделяет временным характеристикам прочности, связанным с механизмом и кинетикой роста трещины разрушения в хрупком и квазихрупком состоянии. Непосредственное изучение кинетики разрушения в каждом конкретном случае производится на основе единой физической модели и различных частных случаев ее математического воплощения. Полученные кинетические уравнения содержат как макроскопические параметры процесса, такие как локальный тензор напряжений и локальная температура, так и микроскопические параметры, характеризующие элементарные акты разрушения. Кинетические уравнения отражают связь и взаимное влияние макро- и микростадий процесса разрушения. Таким образом, в диссертации [2] объединяются четыре подхода к описанию разрушения: кинетический (термофлуктуационная концепция), механический (методы механики трещин для описания локального напряженно-деформированного состояния вблизи трещины), термодинамический (анализ элементарных актов разрушения) и статистический (статистические характеристики элементарных актов, статистические модели длительной прочности). Эта методологическая схема последовательно выдержана во всей диссертации. Тем не менее в диссертации остается много «белых пятен», особенно в понимании термофлуктуационного механизма разрушения в различных усложненных условиях, например, в сочетании таких свойств полимера, как прочность и пластичность.

Одной из первых экспериментальных работ, посвященных анализу влияния химических свойств полимеров и режимов ИК-энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в

локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава, является диссертация Лыткиной Е. М. [3]. В программу лабораторных исследований были включены серии экспериментальных работ, позволяющие проверить общую теорию тепломассообмена в технологии капсулирования изоляции обмоток электрических машин путем применения эффективных методов ИК-энергоподвода и отдельные математические модели взаимодействия системы «излучатель – пропитанная изоляция» в технологических процессах капсулирования длинноволновым, средневолновым и коротковолновым излучателями.

С целью исследования названных технологических процессов была разработана и смонтирована лабораторная установка, которая позволяет осуществлять макетирование основных процессов капсулирования и с помощью специальных приборов определять электрическую и механическую (твердость) прочность.

Программой работ предусматривались также вариации по слюдинитовым лентам и пропиточным материалам.

Результаты данных экспериментальных исследований представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности закапсулированной изоляционной ленты ЛСЭП-934 и ЛСК-110 тпл

Тип изоляционной ленты	Тип излучателя	Тип пропиточного материала		
		ФЛ-98	ПК-11	ВЗТ-1
		Значение пробивного напряжения, кВ		
ЛСЭП-934	Длинноволновый	8,6	9	9,1
	Средневолновый	9,1	9,6	11,4
	Коротковолновый	7,6	8,9	8,2
ЛСК-110 тпл	Длинноволновый	4,5	6,5	4,6
	Средневолновый	4,5	5,1	5,8
	Коротковолновый	6,1	6,3	5,7

Результаты проведенного эксперимента по определению электрической прочности изоляции, пропитанной лаком ФЛ-98 и компаундами ПК-11, ВЗТ-1 при капсулировании различными видами излучателей, показали, что наибольшую электрическую прочность имеет изоляция типа ЛСЭП-934, облученная средневолновым импульсным керамическим преобразователем излучения типа ECS-2.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что твердость изоляции, капсулированной коротковолновым излучателем, на 1 – 2 балла выше по сравнению с изоляцией, облученной средневолновым керамическим излучателем (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований по определению твердости изоляции

Тип ленты	Тип излучателя	Значение твердости, баллы			
		Пропиточный материал			
		ФЛ-98	Эпласт 155	ПК-11	ПК-21
ЛСК-110тпл	Коротковолновый	2	2	4	3
	Средневолновый	1	1	2	3
ЛСЭП-934	Коротковолновый	8	8	5	7
	Средневолновый	8	8	5	6

Развитие этого направления было выполнено в диссертации Е. Ю. Дульского, особенно в теоретическом и экспериментальном плане на производственных моделях [4].

Отличительной особенностью экспериментальных исследований в работе Дульского Е. Ю. является определение электрической прочности и твердости закапсулированной изоляционной ленты ЛЭС-0,1-20 (применяется в качестве покровной для якорей ТЭД типа

НБ-514), полученной не только при непрерывном энергоподводе, но и при осциллирующем. Причем для осциллирующего режима задавались разные значения скорости вращения якоря на установке и различный спектральный состав ИК-излучателей.

Результаты исследований представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности закапсулированной изоляционной ленты ЛЭС-0,1-20

Тип энергоподвода	Значение пробивного напряжения, кВ			
	Пропиточный материал			
	ФЛ-98	Эпласт 155	ПК-11	ПК-21
Конвективный	2,3	–	2,44	2,36
Непрерывный ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями	3,16	3,1	3,02	2,94
Непрерывный ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями	3,06	3,04	2,94	2,88
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (0,46 об/мин)	3,76	3,54	3,56	3,44
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (2,3 об/мин)	3,72	3,52	3,48	3,4
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (4,6 об/мин)	3,66	3,46	3,44	3,42
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (0,46 об/мин)	3,68	3,54	3,52	3,4
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (2,3 об/мин)	3,56	3,48	3,44	3,34
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (4,6 об/мин)	3,52	3,4	3,36	3,34
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (0,46 об/мин)	3,86	3,72	3,7	3,56
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (2,3 об/мин)	3,78	3,7	3,58	3,52
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (4,6 об/мин)	3,74	3,64	3,54	3,48

Результаты исследований электрической прочности закапсулированной изоляции показывают явное преимущество капсулирования ИК-излучением над конвективным по показателям величины пробивного напряжения (на 30 – 35 % выше).

По результатам проведенных исследований определения электрической прочности изоляционной ленты ЛЭС 0,1-20 можно сделать выводы:

1) средние значения пробивного напряжения изоляционной ленты, закапсулированной при осциллирующем режиме, в среднем на 10 % выше значений пробивного напряжения ленты, закапсулированной при непрерывном ИК-энергоподводе (см. таблицу 3);

2) наибольшие показатели электрической прочности изоляционной ленты были получены при капсулировании в спектрально-осциллирующем режиме ИК-энергоподвода с чередо-

ванием средне- и коротковолновых ИК-излучателей при наименьшем количестве периодов облучения (при минимальной частоте вращении якоря ТЭД 0,46 об/мин).

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований по определению твердости изоляции

Тип энергоподвода	Значение твердости, баллы			
	Пропиточный материал			
	ФЛ-98	Эпласт 155	ПК-11	ПК-21
Конвективный	4	5	4	4
Непрерывный ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями	4	5	4	4
Непрерывный ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями	5	6	5	5
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (0,46 об/мин)	5	7	6	5
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (2,3 об/мин)	5	7	6	4
Осциллирующий ИК-энергоподвод со средневолновыми излучателями (4,6 об/мин)	4	7	6	5
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (0,46 об/мин)	4	7	5	4
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (2,3 об/мин)	4	6	4	3
Осциллирующий ИК-энергоподвод с коротковолновыми излучателями (4,6 об/мин)	5	6	4	3
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (0,46 об/мин)	5	7	6	4
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (2,3 об/мин)	5	7	6	4
Спектрально-осциллирующий ИК-энергоподвод с чередованием коротко- и средневолновых излучателей (4,6 об/мин)	5	6	4	3

По результатам определения твердости закапсулированной изоляции можно сделать вывод о том, что наибольшую твердость имеет закапсулированная изоляционная лента, пропитанная в компаунде «Эпласт 155», причем изменение скорости вращения якоря при различных осциллирующих режимах не влияет в значительной мере на показатели твердости.

Анализ работ, рассмотренных выше, с позиций химического состава, структуры пропиточных материалов и режимов ИК-энергоподвода указывает на определяющее значение химических свойств полимера по оптимизации прочности и пластичности при формировании капсулы на поверхности возможной зоны повреждения изоляции. В дальнейших экспериментальных исследованиях при выборе режима ИК-энергоподвода необходимо в конечном результате учитывать степень стеклования, образованного на поверхности изоляции полимера. При высокой степени стеклования полимерная изоляция будет иметь низкую пластичность, что может привести к разрушению изоляции при воздействии вибрационных сил.

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. Валишин, А. А. Комплекс математических моделей механизма разрушения полимеров [Текст]: Дис… доктора физ.-мат. наук / Валишин Анатолий Анатольевич. – М., 2007. – 421 с.

3. Лыткина, Е. М. Основы локального метода продления ресурса изоляции электрических машин тягового подвижного состава тепловым излучением [Текст] // Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский, А. М. Худоногов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 1 (17). – С. 26 – 30.

4. Дульский, Е. Ю. Исследование эффективности осциллирующих режимов инфракрасного энергоподвода в технологии капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава [Текст] // Е. Ю. Дульский, Е. М. Лыткина, А. М. Худоногов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 2 (18). – С. 24 – 30.

References

1. Hudonogov A. M., Lytkina E. M., Dul'skii E. Iu. Innovative technology improve and extend the life of traction rolling stock [Inovac'ionnaiy tehnologia povyshenia i prodlenia resursa tiagovogo podvighnogo sostava]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2012, no. 4 (36). pp. 102 – 108.

2. Vashylin A. A. *Kompleks matematicheskih modelei mehanizma rasrushenia polimerov* (Complex mathematical models of the mechanism of failure of polymers), Doctor's thesis, Moscow, 2007, 421 p.

3. Lytkina E. M., Dul'skii E. Iu., Hudonogov A. M., Fundamentals the local method of extending the life of isolation of electrical machinery of traction rolling stock thermal radiation [Osnovi lokal'nogo metoda prodlenia resursa izoliatsii elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava teplovym izlucheniem]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 26 – 30.

4. Dul'skii E. Iu., Lytkina E. M., Hudonogov A. M. Study of the efficacy of oscillating regimes the infrared energy supply in technologies capsulation winding insulation in the repair of electrical machines traction rolling stock [Issledovanie effektivnosti oscilliruiush'ih reghimov infrokrasnogo energopodvoda v tehnologii kapsulirovaniia izoliatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 2 (18), pp. 24 – 30.

УДК 533.17

Е. В. Кондратенко

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА СКВОЗЬ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТЕЛЕ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

В соответствии с введением новых правил, регламентирующих методы и средства проведения неразрушающего контроля при ремонте деталей и узлов подвижного состава, контроль котлов железнодорожных цистерн проводится ультразвуковыми и капиллярными методами [1]. При этом контролю подвергаются все сварные швы котла, что в условиях вагоноремонтного депо практически невозможно. Это связано с большими объемами и сложностью конструкции объекта контроля, что влечет за собой нарушение регламента ремонта одной подвижной единицы.

Решение этой задачи требует создания методик, обеспечивающих обнаружение и оценку размеров сквозных дефектов по информации, полученной дистанционными способами.

В статье приведено описание построения математической модели газодинамического движения через сквозные дефекты в теле котла железнодорожной цистерны при проведении теплового контроля герметичности котлов цистерн. Созданная математическая модель позволяет учесть процессы истечения газа при

малом перепаде давления и влиянии уровня шероховатости внутренней поверхности сквозного канала на формирование струи истекающего газа. Такое истечение газа способствует образованию в приповерхностном слое котла температурных аномалий, анализ которых позволит оценить геометрические параметры течи дистанционными методами.

Приведено сравнение результатов теоретического моделирования и экспериментальных исследований скорости истечения газа и температуры потока при различных условиях.

В ходе исследования определены законы истечения газа сквозь ряд классических моделей сквозных дефектов. Полученные результаты позволяют корректировать уровень браковочной чувствительности температуры при проведении тепловизионного контроля герметичности котлов железнодорожных цистерн [2].

Обнаружение мест утечек и оценка размеров сквозных дефектов в котлах железнодорожных цистерн на стадии ремонта является важной задачей, поскольку целостность котла цистерны обеспечивает сохранность груза во время его транспортировки, а в случае перевозки ядовитых веществ и окружающей среды.

Решение этой задачи требует создания методик, обеспечивающих обнаружение и получение качественных оценок размеров сквозных дефектов. В силу значительного объема диагностируемого котла железнодорожной цистерны и большого количества зон образования дефектов (области около сварных швов) эти методы должны использовать данные, которые могут быть получены дистанционно, например, с использованием теплочувствительной аппаратуры.

В настоящей работе рассмотрен контроль герметичности тепловым методом, сопряженный с оценкой температурного контраста, возникающего в области сквозных дефектов. Такие температурные неоднородности характеризуются охлаждением берегов (стенок) сквозных дефектов за счет протекания потока газа под давлением. Для создания таких потоков тело котла нагружают избыточным давлением, отличным от атмосферного, разница давлений должна быть не менее 0,1 МПа. Если в теле котла имеется сквозной дефект, то газ, протекающий сквозь такую течь, испытывает изменение внутренней энергии за счет преодоления сил трения при расширении в окружающую среду, в результате чего происходит потеря внутренней энергии газа на охлаждение потока. Такое охлаждение связано со скоростью потока (разностью давлений). Помимо этого охлаждение берегов течи характеризуется конвекционным отводом тепла истекающего газа.

Поэтому при математическом моделировании тепловых процессов необходимо учитывать скорость и расход истекающего сквозь течь газа. Зная законы истечения газа через канал сквозного дефекта, можно легко определить образование тепловых потоков и как результат – выбрать подходящий режим работы оборудования для проведения контроля на герметичность.

В качестве расчетной схемы течи рассмотрим толстостенные трубки двух видов сечения: цилиндрического и щелевого. Такой выбор моделей связан с формами классических дефектов, возникающих при производстве и эксплуатации котлов. Трещины, возникающие в теле котла, характеризуются вытянутым каналом прямоугольного сечения – щелевым каналом. В свою очередь цилиндрический канал моделирует течи, возникающие в результате образования в сварных швах газовых пузырей, шлаковых включений и прожогов. Длина таких каналов характеризуется толщиной стенки котла цистерны, для ряда цистерн пятнадцатой модели толщина стенки составляет 9 мм.

Размеры самих течей по сравнению с объемами котла цистерны незначительны, поэтому при проведении исследований влиянием стенок котла можно пренебречь и ограничиться областью около течи, не превышающей трех длин поперечного сечения канала для щели и трех радиусов для цилиндрической модели дефекта.

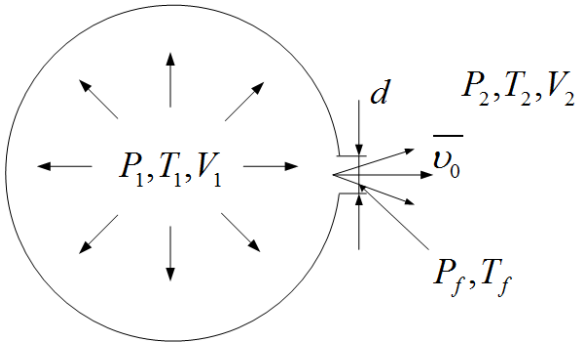


Рисунок 1 – Модель исследуемого резервуара

Рассмотрим процесс истечения газа сквозь мелкое отверстие в теле резервуара (рисунок 1), характеризующийся параметрами состояния газа внутри резервуара – P_1, T_1, V_1, и снаружи (окружающая среда) – P_2, T_2, V_2. Помимо указанных выше параметров существуют параметры, описывающие состояние газа в сечении выходного отверстия, – P_f, T_f.

При описании математической модели истечения газа под давлением воспользуемся термодинамическими законами движения сжимаемых жидкостей или газов. Для любого потока жидкости, газов и паров известна зависимость между давлением и скоростью потока, определяющаяся по закону Бернулли [3, 5]:

$$-VdP = d\left(\frac{\upsilon^2}{2}\right) + \Delta h, \tag{1}$$

где V – объем истекающего газа, м^3;

P – давление истекающего газа, Па;

υ – скорость истечения газа, м/с;

Δh – потери напора, м.

Согласно закону Бернулли при увеличении кинетической энергии движения массы газа необходимо уменьшить первую часть выражения (1). Отсюда следует, что увеличение кинетической энергии потока может достигаться как за счет понижения давления при истечении, так и за счет увеличения удельного объема газа.

Газ, истекающий сквозь малые отверстия, может иметь различные режимы движения, зависящие от перепада давления и критерия Рейнольдса (Re). Так, различают ламинарный режим течения (Re < 2300), переходный (2300 < Re < 4000) и турбулентный (Re > 4000).

Для определения потерь напора по длине канала воспользуемся формулой Дарси – Вейсбаха [4]:

$$\Delta h = \xi \frac{\delta}{d} \frac{\upsilon^2}{2 \cdot g}, \tag{2}$$

где ξ – коэффициент трения;

δ – длина канала (толщина стенки резервуара), м;

d – геометрический размер канала, для цилиндрических течей – диаметр, для щелевых – эквивалентный диаметр, который определяется исходя из площади поперечного сечения канала, (м);

g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Коэффициент трения (потерь напора) есть функция $\xi = f\left(\mathrm{Re}, \Delta_э\right)$ [4], зависящая от критерия подобия Re и уровня эквивалентной шероховатости внутренней поверхности канала. Определяется по выражению:

$$\Delta_э = \frac{Ra}{d}, \tag{3}$$

где Ra – абсолютная шероховатость внутренней поверхности канала.

Таким образом, в случае определения парметров истечения газа через течь закон Бернулли с учетом потерь напора в интегральной форме имеет вид:

$$A = \frac{\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2}{2} + \xi \frac{\delta}{d} \frac{\upsilon_2^2}{2} = \int_{P_1}^{P_2} VdP, \tag{4}$$

где A – работа потока, затраченная на увеличение внешней кинематической энергии, Дж.

Для определения интеграла, находящегося в правой части выражения (4), требуется определить связь между изменением давления и объема истекающего газа. Для этого необходимо учитывать термодинамические процессы, происходящие с газом при истечении.

Так как процесс истечения происходит мгновенно, что исключает внешний теплообмен газа, процесс считается адиабатным, следовательно,

$$P_1 \cdot V_1^{\gamma} = P_2 \cdot V_2^{\gamma} = \text{const}, \tag{5}$$

где γ – адиабатическая постоянная.

Работа, направленная на увеличение кинетической энергии потока газа при его адиабатическом расширении, определяется по уравнению:

$$\frac{\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2}{2} + \xi \frac{\delta}{d} \frac{\upsilon_2^2}{2} = \text{const} \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{P^{\frac{1}{\gamma}}}. \tag{6}$$

Интегрируя правую часть выражения (6) в соответствующих пределах, с учетом отношения параметров состояния вещества получим:

$$\frac{P_2 \cdot V_2}{P_1 \cdot V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}, \tag{7}$$

где T_1, T_2 – абсолютная температура газа внутри резервуара и на выходе из течи соответственно.

Получим окончательное выражение по определению работы:

$$A = \frac{\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2}{2} + \xi \frac{\delta}{d} \frac{\upsilon_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 \cdot V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]. \tag{8}$$

Используя выражения для определения случая истечения газов, предположим, что начальная скорость течения в резервуаре $\upsilon_1 = 0$ (газ неподвижен). Тогда конечное значение скорости $\upsilon_2 = \upsilon$, что является скоростью истечения, с учетом уравнения состояния газа скорость истечения определяется по выражению:

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\xi \frac{\delta}{d}}} \cdot \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{T_1 \cdot R}{\mu_f} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}, \tag{9}$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К);

μ_f – молярная масса газа, кг/моль.

Так, полученное выражение для определения скорости движения газа (9) характеризует максимальную скорость потока с учетом сил трения, вектор которой расположен на оси канала.

Ламинарный профиль скорости характеризуется параболоидом второй степени, вершина которого имеет значение вектора максимальной скорости, расположенного на оси канала [6]. Этот режим связан с равномерным движением газа в виде струек (слоев), при этом перемешивание элементарных струек отсутствует. В общем случае скорость в каждой точке сечения канала определяется по дифференциальному выражению:

$$d\upsilon^2 = 4 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{T_1 \cdot R}{\xi \cdot \delta \cdot \mu_f} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \left(R_{\text{экв}} - \frac{r^2}{R_{\text{экв}}^{\ 2}} \right) dr, \tag{10}$$

где r – анализируемая координата профиля канала, м;

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус течи, м.

При турбулентном режиме течения, в отличие от ламинарного, элементарные струйки перемешиваются, вследствие чего турбулентный поток является неустановившимся. Однако если усреднить параметр потока в какой-либо точке, то осредненные значения будут постоянны для данного места потока. Профиль скорости турбулентного ядра определяется логарифмическим законом Прандтля [7]:

$$\frac{\bar{\upsilon}}{\upsilon} = \frac{1}{\chi} \cdot \ln\left(\frac{\upsilon_{\max} \cdot r}{\nu}\right) + \text{const}, \tag{11}$$

где $\bar{\upsilon}$ – осредненное значение скорости потока, м/с;

χ – число Кармана;

r – анализируемая координата профиля потока, м;

ν – кинематическая вязкость газа, м^2/с.

С расчетной точки зрения во многих случаях применяют эмпирические формулы степенных профилей скорости [7]. Логарифмический профиль скорости по выражению (11) является огибающей семейства степенных профилей:

$$\bar{\upsilon} = \upsilon\left(1 - \frac{r}{R_{\text{экв}}}\right)^n, \tag{12}$$

где n – показатель степени, зависящий от числа Re и шероховатости поверхности канала, вычисляется из условия степенного профиля логарифмическому:

$$n = \frac{2{,}5\sqrt{\frac{\xi}{2}}}{1 - 2{,}5\sqrt{\frac{\xi}{2}}}. \tag{13}$$

Как видно из выражения (13), показатель степени n должен уменьшаться с ростом числа Re, поскольку коэффициент трения уменьшается. Однако если на значение коэффициента оказывает влияние и шероховатость, то показатель n остается почти постоянным. Обычно принимают показатель степени профиля равным $\frac{1}{7}$.

Для обобщенного описания скорости движения элементарных струек по профилю канала течи запишем выражение осредненной скорости турбулентного течения в дифференциальном виде:

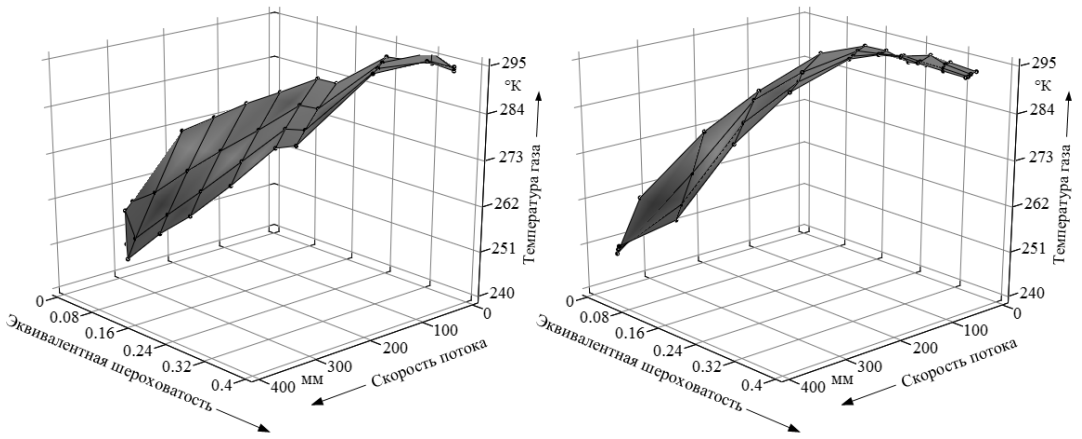
$$d\bar{\upsilon}^2 = 4\frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{T_1 \cdot R}{\xi \cdot \delta \cdot \mu_f}\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right] R_{\text{экв}}\left(1 - \frac{r}{R_{\text{экв}}}\right)^{\frac{1}{7}} dr. \tag{14}$$

В ходе описания физических процессов, происходящих при истечении газа сквозь течь, получены эмпирические зависимости, характеризующие законы распределения скорости при ламинарном (10) и турбулентном (14) течении.

Математический анализ моделей сквозных дефектов проводился с использованием программного модуля Flow Simulation. Данный модуль интегрирован с основным программным пакетом САПР SolidWorks 3D CAD, что позволяет привязать расчет физических полей к модели путем определения блочного построения расчетной сетки с помощью полностью автоматизированного или ручного метода.

Рассмотрим влияние уровня шероховатости внутренней поверхности канала на скорость и температуру истекающего газа в зависимости от перепада давления. При этом значение эквивалентной шероховатости ($\Delta_э$) изменяется в диапазоне от 0 до 0,36.

При увеличении уровня шероховатости размеры турбулентного ядра потока газа уменьшаются, в свою очередь происходит увеличение ламинарного подслоя. Это связано со сложностью обтекания высоких участков (выступов) шероховатости и с повышенным трением газа о поверхность канала. Как результат такого взаимодействия – снижение осредненного значения скорости истечения даже при больших уровнях давления. Результаты изменения скорости и температуры потока газа для двух видов каналов в зависимости от уровня шероховатости приведены на рисунке 2.



а б

Рисунок 2 – Термоповерхности при различных значениях шероховатости канала:
а – цилиндрический канал; б – щелевой

Наименьшее значение температуры газа на выходе из течи характеризует гладкие каналы, имеющие зеркальную внутреннюю поверхность ($\Delta_э$ = 0). Это объясняется размерами турбулентного ядра и практическим отсутствием сил трения при протекании сквозь течь. При этом для двух различных видов каналов при одинаковой площади поперечного сечения температура газа на выходе различается до 13 К. Для течи, имеющей канал в виде щели, происходит более сильное сужение струи газа во фронтальной плоскости, что вызывает повышение скорости истечения газа.

Сравнивая полученные термоповерхности (см. рисунок 2), можно сделать вывод о том, что для щелевого канала изменение параметров истечения в зависимости от эквивалентного уровня шероховатости происходит в узких пределах. Так, при изменении перепада давления на 0,4 МПа при $\Delta_э$, равном нулю, наблюдается повышение скорости потока на 40 м/с и снижение температуры на 10 К. В свою очередь для цилиндрического канала при тех же условиях скорость истечения газа увеличивается на 115 м/с, а температура уменьшается на 23 К. Увеличение уровня эквивалентной шероховатости сводит практически к нулю диапазон изменения параметров истечения, для щелевого канала диапазон скорости – от 14 до 35 м/с, для цилиндрического – от 0,01 до 0,11 м/с. Такое изменение параметров характеризует обратную связь между скоростью и температурой потока, что связано с силами трения, действующими при обтекании диффузной поверхности стенок канала.

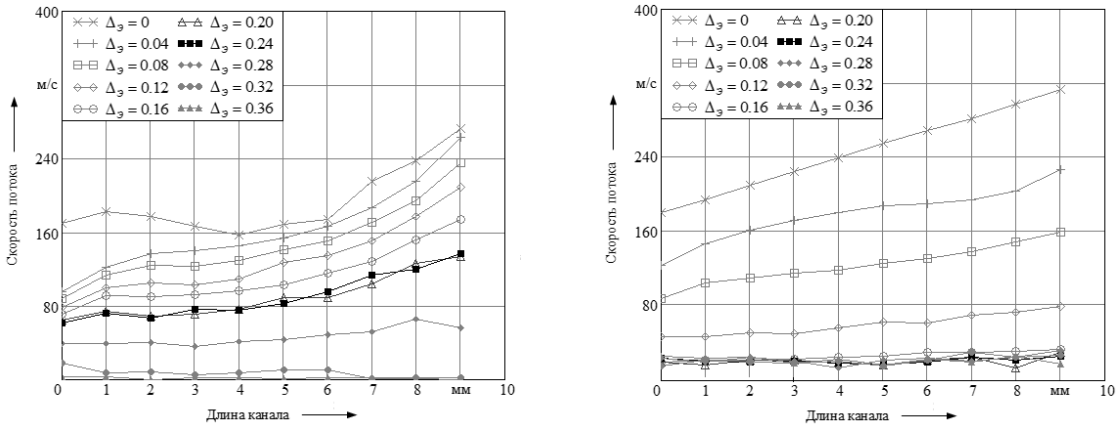
Рассмотрим подробно изменение скорости и температуры потока газа в зависимости от шероховатости. На рисунке 3 представлено изменение скорости потока газа в зависимости от уровня эквивалентной шероховатости по длине канала.

Кривые (см. рисунок 3) изменения скорости характеризуются монотонным экспоненциальным ростом и отсутствием пиков, что подтверждает плавное изменение анализируемого параметра по длине канала. Как уже говорилось, максимальное значение скорости истечения газа преобладает в щелевых дефектах. Из графиков скорости потока щелевого канала стоит выделить две области, на которые разделились кривые.

Первая область включает в себя кривые скорости, полученные при $\Delta_э$ равном 0 – 0,12 (рисунок 3, б). В этой области происходит монотонное увеличение скорости истечения по

длине канала и на выходе канала, скорость равна 80 – 320 м/с. Данная область характеризуется турбулентным потоком движения газа и минимальным приповерхностным ламинарным подслоем, равным примерно высоте шероховатости.

Вторая область скоростей щелевого канала характеризуется незначительным изменением анализируемого параметра. При значениях $\Delta_э$ в диапазоне от 0,16 до 0,36 скорость на выходе из канала не превышает 40 м/с, что связано с толщиной ламинарного подслоя, который в разы превышает турбулентное ядро. Поэтому изменение скорости в данной области связано с плавным обтеканием выступов шероховатости в ламинарном потоке.



а б

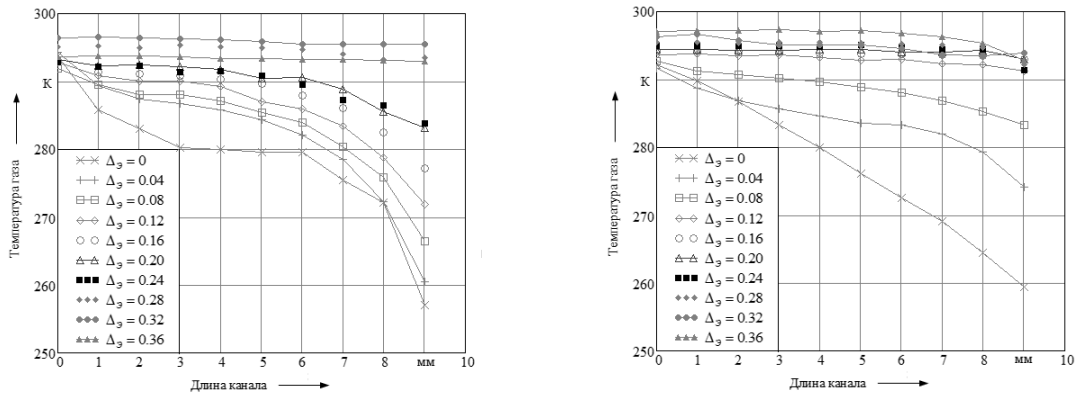
Рисунок 3 – Изменение скорости газа по длине канала при различном уровне шероховатости:
а – цилиндрический канал; б – щелевой

Изменение скорости в цилиндрическом канале (рисунок 3, а) также можно разделить на две области с единственным различием в интервале значений $\Delta_э$.

Первая область для цилиндрического канала характеризуется также монотонным увеличением скорости истечения газа по длине канала, в данную область попадают кривые, полученные при $\Delta_э$ 0 – 0,24. В этом случае скорость истечения газа из канала варьируется от 130 до 280 м/с.

Вторая область для цилиндрического канала будет характеризоваться скоростью менее 40 м/с и значениями $\Delta_э$ 0,28 – 0,36. При этом кривые, полученные при последних двух значениях $\Delta_э$ (0,32 и 0,36), характеризуются практическим отсутствием движения газа, скорость движения равна 0,04 м/с (см. рисунок 3, а).

Аналогичным образом ведут себя кривые изменения температуры истекающего газа (рисунок 4).



а б

Рисунок 4 – Изменение температуры по длине канала при различном уровне шероховатости:
а – цилиндрический канал; б – щелевой

При щелевом канале (см. рисунок 4, б) значительное понижение температуры наблюдается в первой области скоростей истечения газа при $\Delta_э$ 0 – 0,12. Изменение температуры при остальных значениях $\Delta_э$ мало, а при $\Delta_э$, равном 0,36, происходит нагрев газа примерно на 1 К, это связано с достаточно высоким уровнем шероховатости и уменьшением полезной площади канала.

В цилиндрическом канале (см. рисунок 4, а) распределение температуры более интенсивно. Из общего фона можно выделить три кривые, полученные при значениях $\Delta_э$ 0,28; 0,32 и 0,36. Для этих кривых значение температуры не изменяется и остается на первоначальном уровне (293 К).

Достоверность проведенных исследований и предложенных при этом математических моделей процессов истечения иллюстрируется на рисунках 5 и 6.

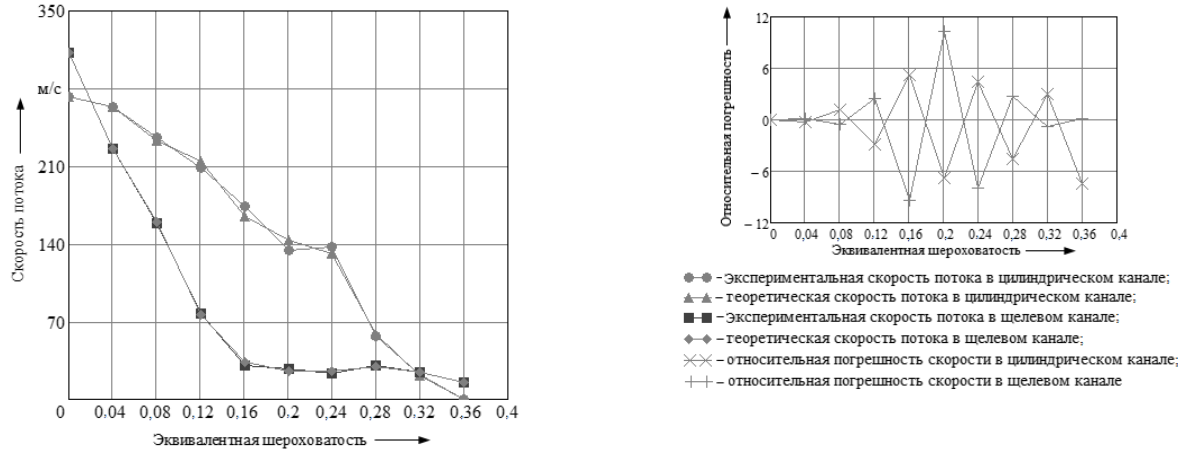


Рисунок 5 – Сравнение значений скорости истечения газа из различных каналов

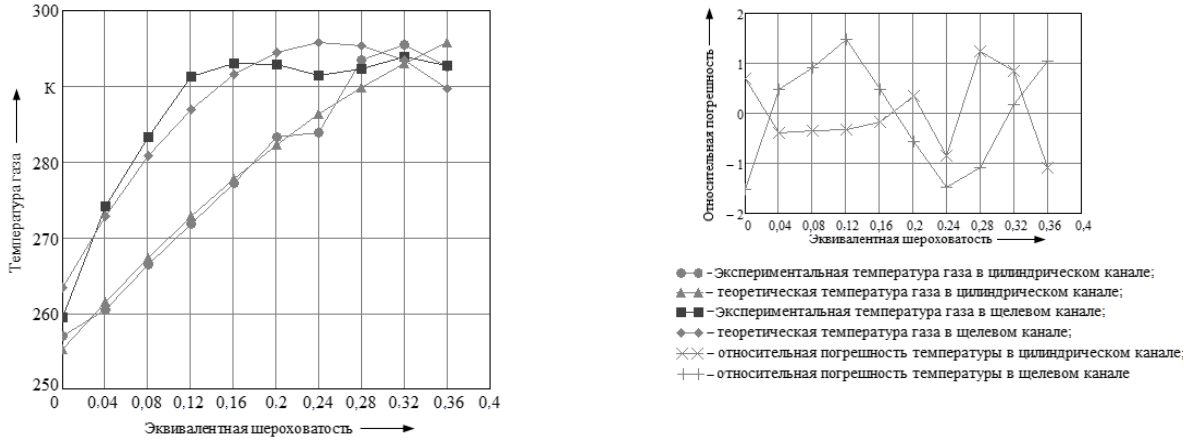


Рисунок 6 – Сравнение значений температуры истекающего из различных каналов газа

Сравнивая экспериментальные значения скоростей с теоретическими, по выражениям (10) и (14) получили максимальную погрешность для цилиндрического канала 8 % и для щелевого – 10 (см. рисунки 5 и 6). При этом погрешность расчета температуры потока газа на выходе из течи в зависимости от уровня эквивалентной шероховатости не превышает 2 % для щелевого канала и 1,5 для цилиндрического.

В ходе математического моделирования определены законы истечения газа сквозь модели дефектов, выявлены профили скоростей по поперечному сечению каналов и закономерности формирования вектора скорости потока в зависимости от уровня шероховатости поверхности канала. При этом предложенная математическая модель скорости потока обеспечивает точность результатов не менее 90 %.

Найдена зависимость температуры истекающего потока газа от скорости истечения, для этого рассмотрены и определены температурные зависимости потока газа по длине канала

течи. Выявлена прямая связь между уровнем шероховатости и температурой потока газа на выходе из течи. При этом разница температуры потока истекающего газа на выходе из течи между теоретическими и экспериментальными данными составляет не более 2 %.

В результате анализа зависимостей температуры и скорости движения потока газа можно сделать вывод о том, что в ходе проведения контроля герметичности необходимо учитывать минимальные размеры трещины и шероховатости ее внутренней поверхности. Во время анализа полученных термограмм необходимо обращать внимание на установку точного уровня порогового значения температуры для выявления температурных аномалий (контраста температур на внешней поверхности резервуара) [8].

Список литературы

1. ПР НК В.5-2013 Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте вагонов. Специальные требования. – М., 2013. – 60 с.

2. Пат. 2520952 Российская Федерация, G 01 N 25/00. Способ теплового контроля герметичности крупногабаритного сосуда [Текст] / А. Р. Ахмеджанов, Е. В. Кондратенко (Россия); заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012152487; заявл. 05.12.2012; опубл. 28.04.2014.

3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика [Текст] / Д. В. Сивухин. – М.: Физмалит, 2005. – Т. II. – 544 с.

4. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик; Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

5. Кошкин, В. К. Термодинамическая теория истечения газов и паров, процесс дросселирования / В. К. Кошкин, Т. В. Михайлова / Московский авиационный ин-т. – М., 1983. – 53 с.

6. Юрьев, А. С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем [Текст] / А. С. Юрьев. – СПб: Мир и семья, 2001. – 1154 с.

7. Волчков, Э. П. Тепломассообмен в пристенных течениях [Текст] / Э. П. Волчков, В. П. Лебедев / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2003. – 244 с.

8. Кондратенко, Е. В. Оценка возможности использования теплового метода контроля герметичности котла железнодорожной цистерны [Текст] / Е. В. Кондратенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 18 – 24.

References

1. PR NK V.5-2013 *Terms of non-destructive testing of welded joints in the repair of cars. Special requirements* (PR NK V.5-2013 Pravila nerazrushajushhego kontrolja svarnyh soedinenij pri remonte vagonov. Special'nye trebovanija). Moscow, 2013. – 61 p.

2. Akhmedzhanov R. A., Kondratenko E. V. *Patent RU 2012152487 G 01*, 05.12.2012.

3. Sivuhin D.V. *Obshhij kurs fiziki. Termodinamika i molekuljarnaja fizika* (The general course of physics. Thermodynamics and molecular physics) Moscow: Fizmalit, 2005, 544 p.

4. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam* (Handbook of hydraulic resistance). Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p.

5. Koshkin V. K., Mihajlova T.V. *Termodinamicheskaja teorija istechenija gazov i parov, process drosselirovanija* (The thermodynamic theory of the expiration of gases and vapors, throttling process). Moscow: MAI, 1983, 53 p.

6. Jur'ev A. S. *Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventiljacionnyh system* (Handbook of hydraulic calculations and ventilation systems). Saint Petersburg: Mir i sem'ja, 2001, 1154 p.

7. Volchkov Je.P., Lebedev V.P. *Teplomassoobmen v pristennyh techenijah* (Heat and mass transfer in the near-wall flows). Novosibirsk: NGTU, 2003, 244 p.

8. Kondratenko E. V. Evaluation of the possibility of using thermal method for leakage testing of the boiler of a railroad tank car [Ocenka vozmozhnosti ispol'zovanija teplovogo metoda kontrolja germetichnosti kotla zheleznodorozhnoj cisterny]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 18 – 24.

УДК 629.471

И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕПЛОВОЗОВ

Бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) современных тепловозов позволяют не только управлять оборудованием тепловоза, но и анализировать процесс их работы при помощи методов математической статистики, что подтверждается исследованиями авторов статьи. Предложен метод диагностирования предотказных состояний с использованием корреляционного анализа данных МСУ.

С 2012 г. сервисная локомотивная компания «ТМХ-Сервис» использует данные бортовых МСУ для мониторинга технического состояния локомотивов, выявления предотказных состояний, контроля нарушений режимов эксплуатации. В настоящее время в ООО «ТМХ-Сервис» созданы группы диагностики в 39 сервисных локомотивных депо (СЛД), а до конца 2015 г. будут созданы во всех депо.

Возможности диагностирования локомотивов ограничены возможностями самих МСУ – числом датчиков и объемом памяти этих систем управления. Одним из самых информативных следует считать МСУ тепловозов серий 2ТЭ116У (МСУ-ТП) и ТЭП70БС (МСУ-ТЭ).

МСУ-ТП – бортовая микропроцессорная система с поосным регулированием силы тяги, устанавливающаяся серийно на тепловозы 2(3)ТЭ116У. По своей сути МСУ-ТП представляет собой промышленный компьютер со специализированным набором входных и выходных преобразователей, управляющими органами (сервоприводы, бесконтактные переключатели, преобразователи) и датчиками. В комплекте МСУ-ТП порядка 200 датчиков, среди которых можно выделить следующие (рисунок 1):

– датчики тока каналов выпрямительной установки (ВУ) (1);
– тока и напряжения главного генератора (2);
– частоты вращения коленчатого вала дизеля (3);
– температуры выхлопных газов на входе в турбокомпрессор (4);
– частоты вращения ротора турбокомпрессора (5);
– температуры воды на входе и выходе из радиаторов охлаждения (6);
– включения мотор-вентиляторов охлаждения (7);
– блок микропроцессорной системы управления тепловозом (8);
– скорости вращения колесных пар (9);
– температуры отработанных газов на выходе из цилиндров (10);
– токов тяговых электродвигателей (ТЭД) (11).

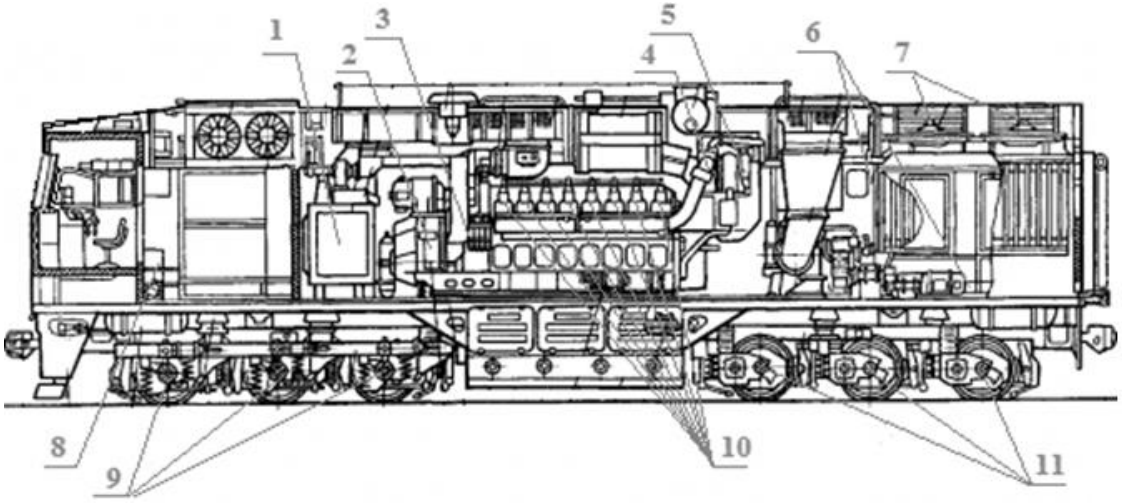


Рисунок 1 – Расположение датчиков МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У

Для взаимодействия с локомотивной бригадой имеется дисплейный модуль, в котором предусмотрена функция сохранения показаний датчиков на жестком диске для дальнейшей расшифровки.

Для использования данных МСУ-ТП и МСУ-ТЭ при диагностировании в ТМХ-Сервис совместно с ОАО «ВНИКТИ» разработано стационарное автоматизированное рабочее место «Осциллограф-2», позволяющее автоматизированно диагностировать тепловоз по данным, считанным с МСУ-ТП и МСУ-ТЭ. Наряду с тепловозами 2ТЭ116У и ТЭП70БС «Осциллограф-2» позволяет диагностировать тепловозы, оборудованные МСУ типа УСТА при наличии бортового компьютера УПУ. Наиболее эффективно АРМ «Осциллограф-2» используется в сервисных локомотивных депо Волгоград, Санкт-Петербург-Сортировочный Витебский и Югра.

С целью анализа режимов работы тепловозов авторами статьи начата работа по статистической обработке данных МСУ-ТП парка тепловозов в MS Excel с использованием встроенного языка программирования Visual Basic for Applications (VBA). Впервые подобный анализ данных поездок тепловозов 2ТЭ116У был описан в 2011 г. в ПГУПСе [1], однако для нужд диагностики ООО «ТМХ-Сервис» потребовалось существенно расширить как набор анализируемых параметров, так и охват проведенного анализа. В ходе работ проанализированы данные 880 поездок 67 тепловозов серии 2ТЭ116У по трем железным дорогам: Свердловской, Приволжской и Октябрьской.

Правильность использования статистического аппарата проверена на кафедре «Электропоезда и локомотивы» МИИТа [2]. Методически предложено проверять все данные на соответствие одному из законов распределения случайной величины. Главный из них – это нормальное распределение, или распределение Гаусса. Строго говоря, о среднем значении величины можно говорить только в том случае, если она подчиняется нормальному распределению.

Анализ среднего значения времени работы по позициям контроллера машиниста (КМ) (рисунок 2) подтвердил информацию [1] о преобладании работы на нулевой позиции (46 % от всех данных) контроллера на локомотивах всех трех железных дорог. Однако подробный анализ процента времени работы на нулевой позиции КМ (рисунок 3) показал, что распределение не подчиняется нормальному закону и вместо среднего значения в 46 % наблюдается два пика в 21 – 30 и 61 – 70 %.

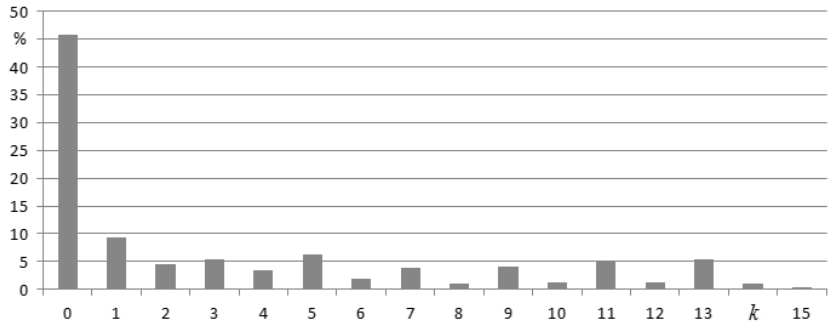


Рисунок 2 – Распределение времени работы по позициям контроллера *k*

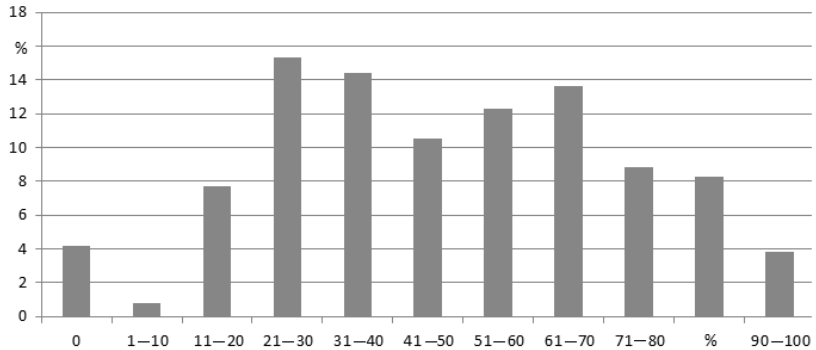
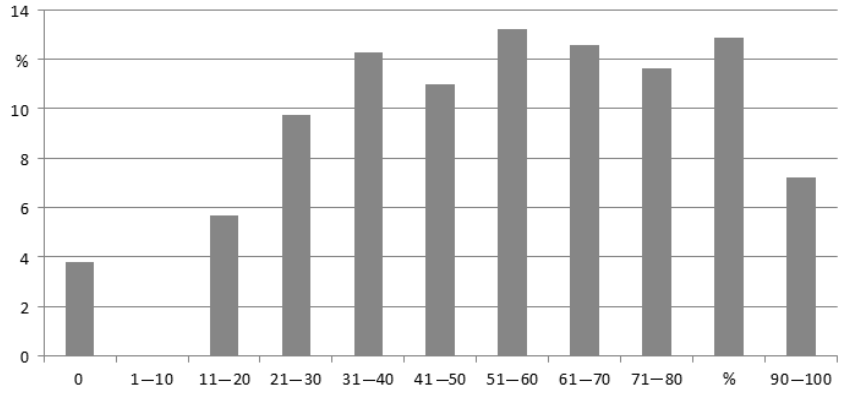
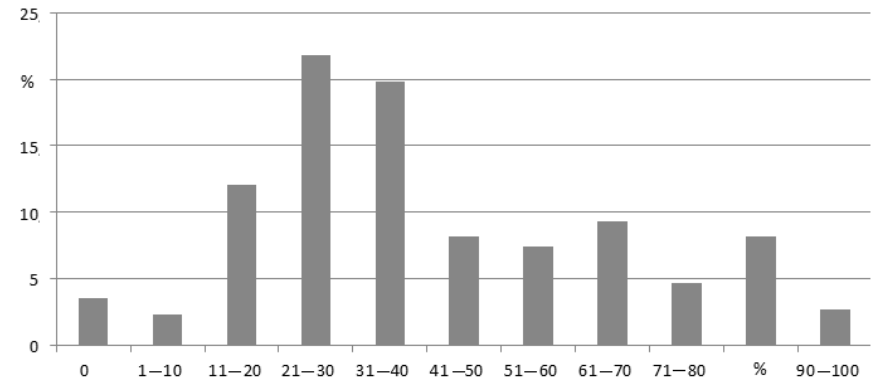


Рисунок 3 – Распределение процента времени работы на нулевой позиции

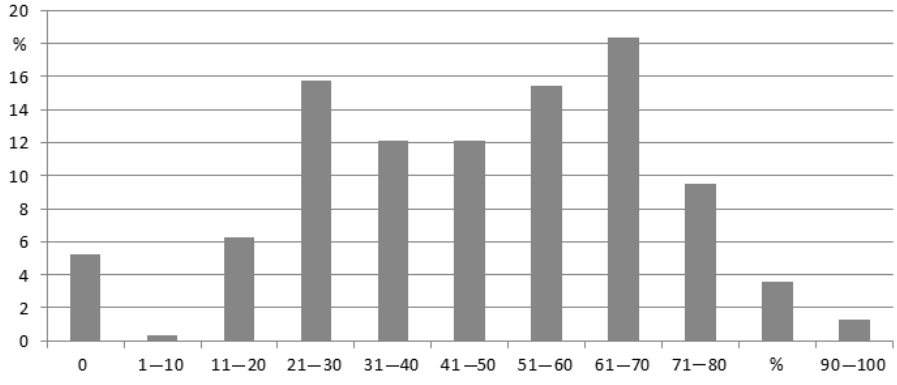
Подробный анализ распределения времени работы на 0 ПКМ по каждой дороге (рисунок 4) показал, что оно также не подчиняется нормальному закону и среднего значения наработки на холостом ходу не существует. Это объясняется тем, что работа на 0 ПКМ может иметь место как при запуске или остановке дизеля (что длится не так долго), так и при ожидании работы, на длительность которого влияет большое количество факторов различной природы. В конечном итоге влияние этих факторов создает шум, не позволяющий определить с достаточной точностью среднее значение наработки.



а



б

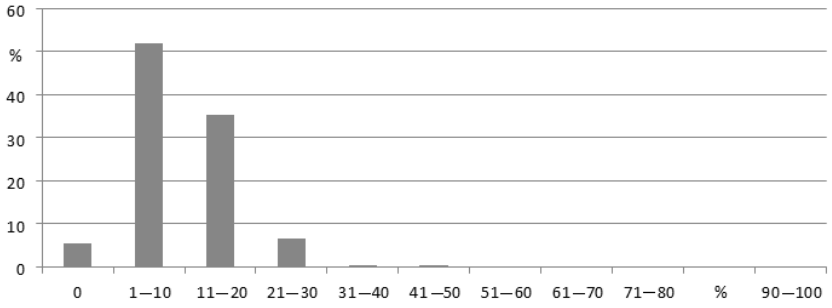


в

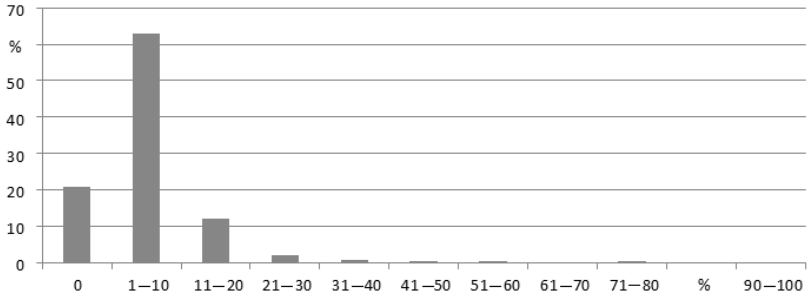
Рисунок 4 – Распределение времени работы на 0 ПКМ по железным дорогам: а – Октябрьская; б – Свердловская; в – Приволжская

Абсолютно иным образом обстоит ситуация с анализом рабочих позиций контроллера, для которых наибольшая наработка наблюдается на 1-й, 5-й и 13-й ПКМ (рисунок 5). Для всех трех позиций характерно наличие ярко выраженного нормального распределения, пик которого совпадает с наблюдаемым временем работы на данной позиции контроллера.

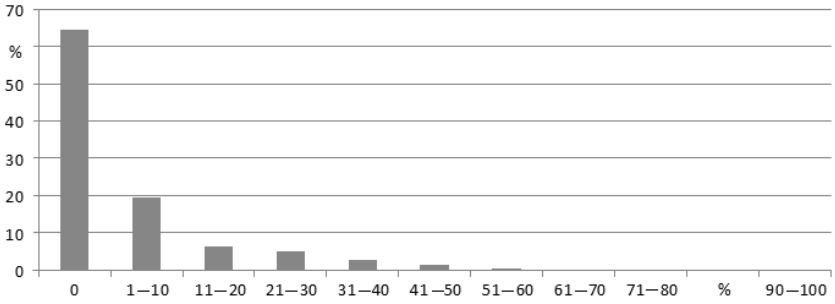
Смещение распределения влево с увеличением позиции объясняется уменьшением времени работы на конкретной позиции с увеличением позиции контроллера.



а



б



в

Рисунок 5 – Распределение времени работы на 1-й (а), 5-й (б) и 13-й (в) ПКМ

Таким образом, для рабочих позиций контроллера существует явно выраженное среднее значение, что говорит об объективности данных, приведенных на рисунке 2.

Поскольку анализ времени работы дизеля на позиции контроллера машиниста характеризует режимы его работы весьма поверхностно, был проведен дополнительный анализ работы, совершенной дизель-генераторной установкой по каждой позиции (рисунок 6).

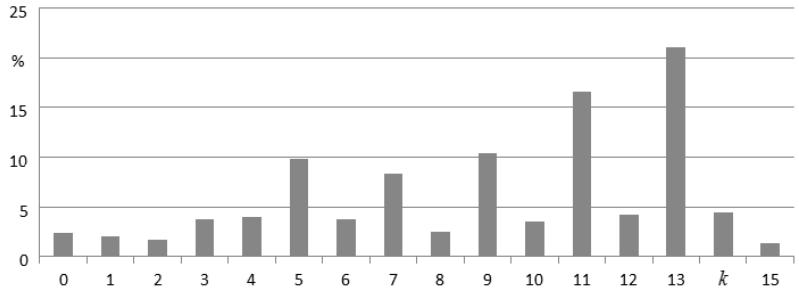
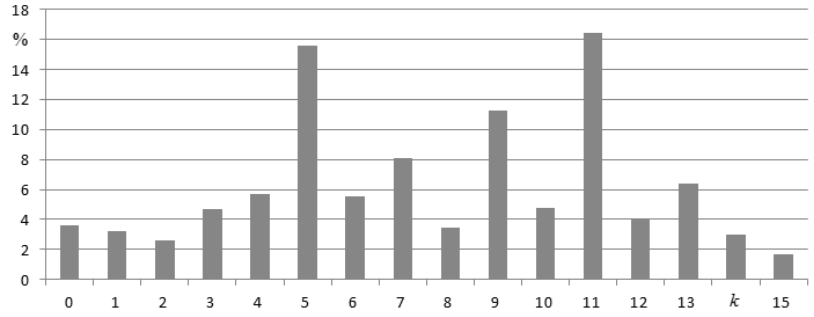


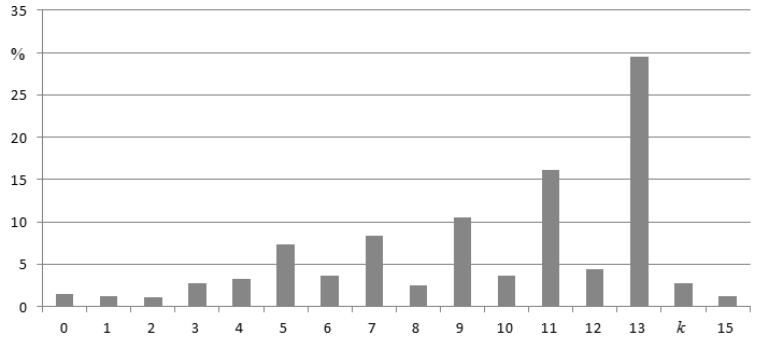
Рисунок 6 – Распределение работы по позициям контроллера *k*

Примечательно, что для тепловозов Октябрьской железной дороги характерно преобладание работы на 5-й и 11-й ПКМ (рисунок 7, а), в то время как для Свердловской (рисунок 7, б) –

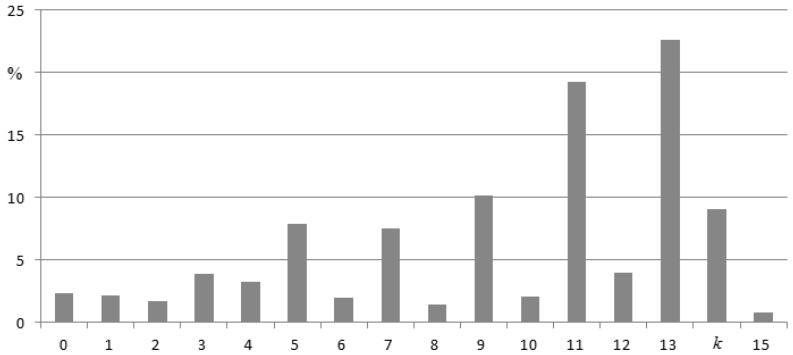
на 13-й ПКМ, а для Приволжской (рисунок 7, в) на 11-й и 13-й ПКМ. Это позволяет сделать вывод о том, что условия эксплуатации тепловозов на Свердловской и Приволжской железных дорогах схожи, в то время как на Октябрьской железной дороге тепловозы нагружены меньше. Также для всех трех указанных железных дорог было обнаружено преобладание работы на нечетных позициях контроллера над четными, причем сильнее всего оно выражено для Свердловской железной дороги.



а



б



в

Рисунок 7 – Распределение проделанной работы по железным дорогам: а – Октябрьская; б – Свердловская; в – Приволжская

На рисунках 6 и 7 видно, что несмотря на преобладание времени работы на 0-й, 1-й и 5-й ПКМ доля работы, совершенной на этих позициях, невелика, а максимальная работа совершается на 13-й ПКМ (распределение времени работы на 13-й ПКМ приведено на рисунке 8).

На рисунке 7 видно, что распределение времени работы по позициям не подчиняется нормальному закону, имея два пика в районе 11 – 20 и 51 – 60 %. Подобный характер распределения сохраняется и при отдельном рассмотрении работы на 13-й ПКМ на каждой железной дороге (рисунок 9).

На рисунке 8 видно, что для Свердловской и Приволжской железных дорог, на которых 13-й ПКМ является основной по совершенной работе, распределение проделанной работы

имеет ярко выраженный многомодальный характер, в то время как для Октябрьской железной дороги многомодальность выражена значительно слабее.

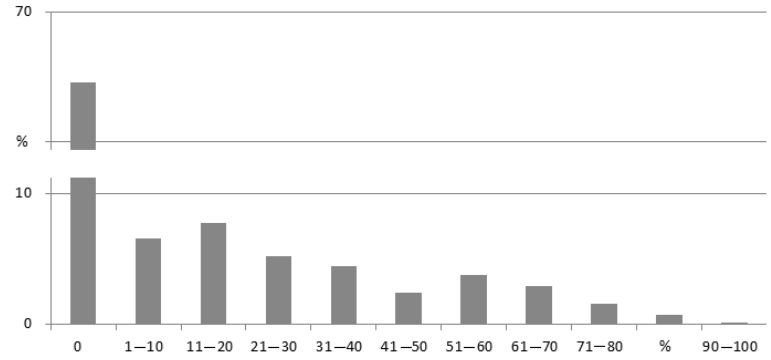
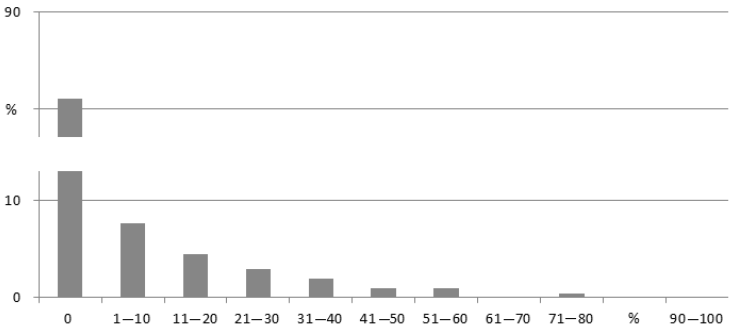
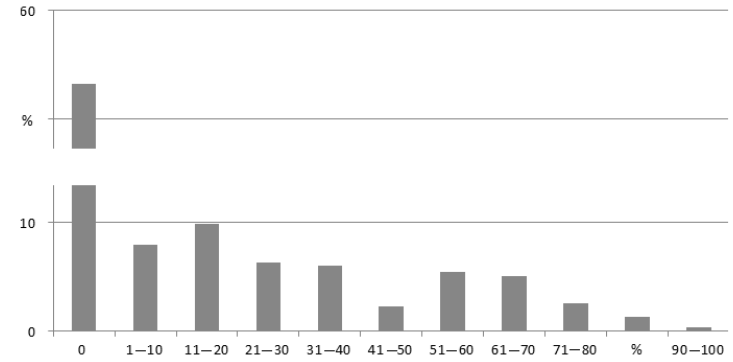


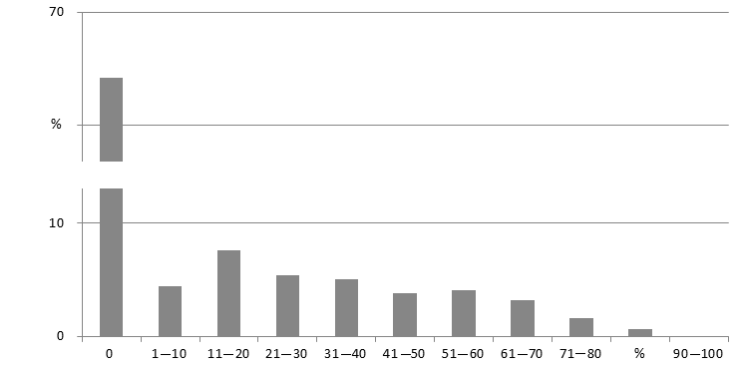
Рисунок 8 – Распределение работы, проделанной на 13-й ПКМ



а



б



в

Рисунок 9 – Распределение работы, проделанной на 13-й ПКМ по регионам: а – Октябрьская; б – Свердловская; в – Приволжская

Зная экономическую характеристику тепловозного дизеля (рисунок 10), из приведенных выше графиков распределения работы по позициям контроллера легко сделать выводы об эффективности расходования топлива.

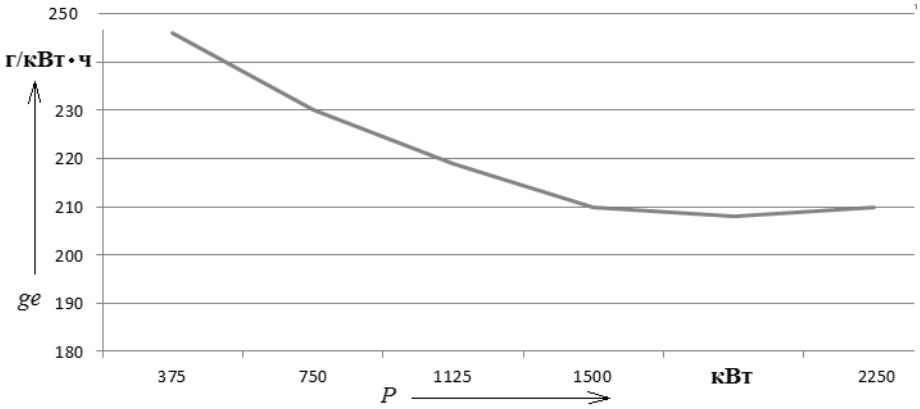


Рисунок 10 – Экономическая характеристика дизеля 16ЧН2А 26/26

Из рисунка 10 видно, что минимальное потребление топлива достигается при мощности 1875 кВт, что эквивалентно 13-й ПКМ, в то время как 73 % работы совершается на низших позициях. Расчеты, проведенные на основании статистики работы тепловозов, показали, что перенастройка рабочего процесса тепловозного дизеля под минимальное потребление топлива на 11-й ПКМ позволит получить экономию топлива до 2,5 %, а применение двухдизельного тепловоза (при имеющихся экономических характеристиках) – от 3 до 4,5 % в зависимости от алгоритма управления дизелями.

Иной подход был применен при анализе работы электрической передачи тепловоза: для каждой поездки была выполнена проверка значений токов на равенство двух средних значений заданных параметров и корреляционный анализ с целью выявления отклонений (неисправностей) в цепи одного из двигателей. Была выдвинута нулевая гипотеза о том, что цепь тягового двигателя, в которой имеет место предотказное состояние (пока себя не проявившее и не замеченное машинистом), должна иметь отличия при статистической обработке данных.

Оценка вероятности равенства двух средних значений для заданных параметров рассчитывается по формуле:

$$r = N_1 + N_2 - 2, \tag{1}$$

где r – число степеней свободы; $N_{1,2}$ – объем выборок.

Затем по формуле (2) определяется критерий Стьюдента:

$$t_{\text{P}} = \frac{\left|m_x - m_y\right|}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{N_1} + \frac{\sigma_y^2}{N_2}}}, \tag{2}$$

где m_x, m_y – математическое ожидание (мера среднего значения случайной величины); $\sigma_{x,y}$ – среднеквадратичное отклонение (показатель рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания).

После этого по таблице «значений критерия Стьюдента для оценки вероятности равенства математических ожиданий» [6] производится сравнение расчетного значения критерия Стьюдента с табличным значением.

Проверка на вероятность равенства двух средних значений для заданных параметров оказалась неэффективной, поскольку при большом количестве анализируемых данных (количество записей в одной поездке может достигать 9999 шт.) метод становится излишне чувствительным к незначительным отклонениям.

Гораздо более эффективной оказалась проверка токов с помощью корреляционного анализа [7], рассчитанного по формуле (3):

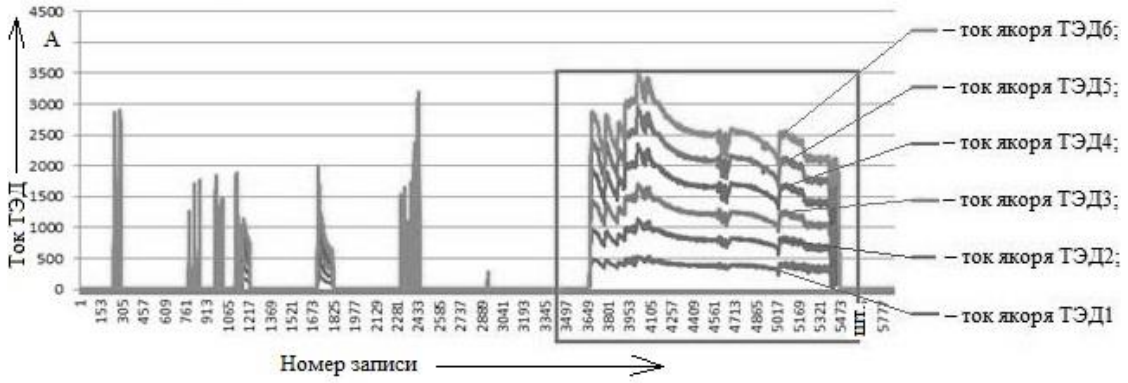
$$r_{y,x} = \frac{\alpha_{11}(y,x) - m_y m_x}{\sigma_y \sigma_x}, \quad (3)$$

где $\alpha_{1,1}(y,x)$ – второй смешанный начальный момент, характеризующий математическое ожидание попарного произведения случайных величин, составляющих выборки исходных данных.

По каждой поездке ток каждого из ТЭД сравнивался со средним значением всех шести токов ТЭД. По результатам выполненного корреляционного анализа в 847 поездках (96 % случаев) коэффициент корреляция токов ТЭД был более 99,7 %. При этом были выявлены 33 поездки 10 тепловозов, в которых ток одного или нескольких ТЭД имел уменьшенный коэффициент корреляции:

– 3 поездки с коэффициентом корреляции тока одного ТЭД 96 – 99,0 %;
– 2 поездки с коэффициентом корреляции тока нескольких ТЭД 96 – 99,0 %;
– 11 поездок с коэффициентом корреляции тока одного ТЭД 1 – 90 %;
– 5 поездок с коэффициентом корреляции тока нескольких ТЭД 1 – 90 %;
– 9 поездок с коэффициентом корреляции тока нескольких ТЭД менее 1 %.

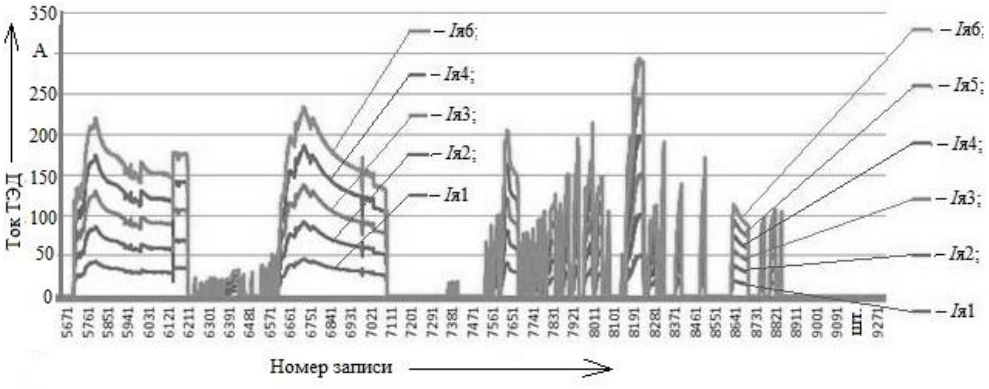
Анализ этих случаев показал, что коэффициенту корреляции тока одного или нескольких ТЭД в 95 – 99 % соответствуют случаи постоянно существующего отклонения от нормы тока одного или нескольких ТЭД (рисунок 11). Меньший коэффициент корреляции соответствует случаям потери или полного отсутствия сигнала датчиков тока или отключению ТЭД (рисунок 12).



	ТЭД1	ТЭД2	ТЭД3	ТЭД4	ТЭД5	ТЭД6
Коэффициент корреляции (%)	95,672	99,671	99,307	99,547	99,744	99,811
Токи ТЭД	499	584	558	595	588	574
	535	589	569	622	593	579
	528	600	582	620	611	597
	535	600	583	634	608	590
	504	601	584	624	603	600
	540	601	578	634	595	588

Рисунок 11 – Пример случая превышения допустимого разброса токов ТЭД

Таким образом, коэффициент корреляции токов ТЭД с их средним значением является чувствительным и информативным источником информации о техническом состоянии силовых цепей ТЭД.



	ТЭД1	ТЭД2	ТЭД3	ТЭД4	ТЭД5	ТЭД6
Коэффициент корреляции (%)	99,332	99,332	99,249	98,472	98,453	-1,057
Токи ТЭД	865	853	861	891	899	2
	858	849	855	886	898	3
	856	848	854	884	891	2
	854	842	854	884	892	2
	852	839	850	881	884	2
	846	835	846	869	885	3

Рисунок 12 – Пример случая отключения ТЭД

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Корреляционный анализ параметров однотипного оборудования и узлов локомотива (цилиндры дизеля, тяговые двигатели и др.) позволяет выявлять предотказные состояния работоспособного оборудования до наступления зафиксированного в эксплуатации отказа. Метод может быть использован как встроенный алгоритм диагностирования бортовых микропроцессорных систем управления, так и как математический метод в стационарных деповских автоматизированных системах технического диагностирования (АСТД).

2. Анализ объема работы, совершенной на различных позициях контроллера машиниста, показал, что наибольшая работа совершается на 11-й и 13-й ПКМ, следующими по количеству совершенной работы идут 5-я и 9-я ПКМ.

3. При исправном состоянии силовой подсистемы тепловоза коэффициент корреляции между средним значением тока и током каждого из ТЭД составляет 0,97 – 0,9998.

4. Падение коэффициента корреляции одного ТЭД до значения не менее 0,7 свидетельствует о наличии неисправности.

5. Падение коэффициента корреляции тока одного ТЭД менее 0,7 свидетельствует о наличии отключенного ТЭД на протяжении всей поездки или ее части.

6. Падение одного коэффициента корреляции одного ТЭД менее 0,3 свидетельствует о неисправности датчика или отключении ТЭД.

7. Падение всех коэффициентов корреляции менее 0,9 свидетельствует о наличии неисправности группы двигателей (например, тележки).

8. Исследования авторов в области использования статистической обработки данных для диагностирования предотказных состояний тепловозов будут продолжены и будут использованы в автоматизированной системе управления надежностью локомотивов в сервисной компании ООО «ТМХ-Сервис».

Список литературы

1. Валиев, М. Ш. Повышение эффективности работы тепловозов средствами бортовых систем диагностики [Текст]: Дис… канд. техн. наук: 05.22.07 / М. Ш. Валиев. – Санкт-Петербург, 2011. – 161 с.

2. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис [Текст] / К. В. Липа, В. И. Гриненко и др. / ТМХ-Сервис. – М., 2012. – 160 с.

3. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления [Текст] / К. В. Липа, В. И. Гриненко и др. / ТМХ-Сервис. – М., 2013. – 156 с.

4. Лакин, И. К. Модуль статистики ЕСМТ. Алгоритмы функционирования. Технические требования [Текст] / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, А. В. Скребков. / ТМХ-Сервис. – М., 2014. – 41 с.

5. Мельников, В. А. Автоматизированное рабочее место диагностирования тепловоза по данным бортовой микропроцессорной системы управления [Текст] / В. А. Мельников, А. А. Аболмасов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / ТМХ-Сервис. – М., 2014. – С. 222.

6. Адлер, Ю. П. Статистическое оценивание [Текст] / Ю. П. Адлер, В. Г. Горский – М.: Статистика, 1976. 598 с.

7. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

References

1. Valiev M. Sh. *Povyshenie effektivnosti raboty teplovozov sredstvami bortovykh sistem diagnostiki* (DPU efficiency increasing by means of onboard diagnostic systems). PhD thesis, St. Petersburgh, 2011, 161 p.

2. Lipa K. V., Grinenko V. I., Liangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A., Mel'nikov V. A. *Avtomatizirovannaia sistema upravleniia nadezhnost'iu lokomotivov (ASUNT). Kontseptsiia TMKh-Servis* (Automatical locomotive reliability control system (ASUNT). The concept by TMH-Service). Moscow: TMKh-Servis, 2012, 160 p.

3. Lipa K. V., Grinenko V. I., Liangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A., Mel'nikov V. A., Grinenko A. V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia lokomotivov po dannym bortovykh mikroprotsessornykh sistem upravleniia* (Locomotive technical state monitoring by means of onboard microprocessor control systems). Moscow: TMKh-Servis, 2013, 156 p.

4. Lakin I. K., Abolmasov A. A., Skrebkov A. V. *Modul' statistiki ESMT. Algoritmy funktsionirovaniia. Tekhnicheskie trebovaniia* (ESMT statistic module. Algorithms of functioning). Moscow: TMKh-Servis, 2014, 41 p.

5. Mel'nikov V. A., Abolmasov A. A. Automated locomotive diagnostic workplace by means of onboard microprocessor control system data [Avtomatizirovannoe rabochee mesto diagnostirovaniia teplovoza po dannym bortovoi mikroprotsessornoi sistemy upravleniia]. *Materialy Pervoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivy razvitiia servisnogo obsluzhivaniia lokomotivov»* (First international science and practical conference materials «Locomotive service prospects»). – Moscow, 2014, p. 222.

6. Adler. Iu. P. *Statisticheskoe otsenivanie* (Statistical evaluation). Moscow: Statistika, 1976, 598 p.

7. Venttsel' E. S. *Teoriia veroiatnostei* (Probability theory). Moscow: Science, 1969, 576 p.

УДК 629.424.1

В. А. Михеев

ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

В статье рассматривается подход к обобщенной оценке технического состояния функциональных подсистем энергетической установки тепловоза, основанный на сведении частных параметров, выделенных по результатам анализа граф-модели, к одномерной временной функции с использованием математического выра-

жения нелинейного среднего. Представлены результаты обобщенной оценки технического состояния топливной системы энергетической установки.

Энергетическая установка представляет собой иерархически сложную систему тепловоза, включающую в себя ряд взаимосвязанных функционально самостоятельных подсистем (рисунок 1). В процессе эксплуатации функциональные подсистемы энергетической установки тепловоза подвержены многочисленным неисправностям и отказам, приводящим к изменению технического состояния с соответствующим снижением технико-экономических показателей и эксплуатационной надежности. Достоверная оценка фактического технического состояния подсистем в процессе эксплуатации даст возможность определить уровень работоспособности всей энергетической установки в данный момент времени, выявить ее соответствие техническим требованиям, сделать заключение о возможности ее дальнейшей эксплуатации и в конечном итоге назначить комплекс требующихся ремонтных или обслуживающих воздействий.

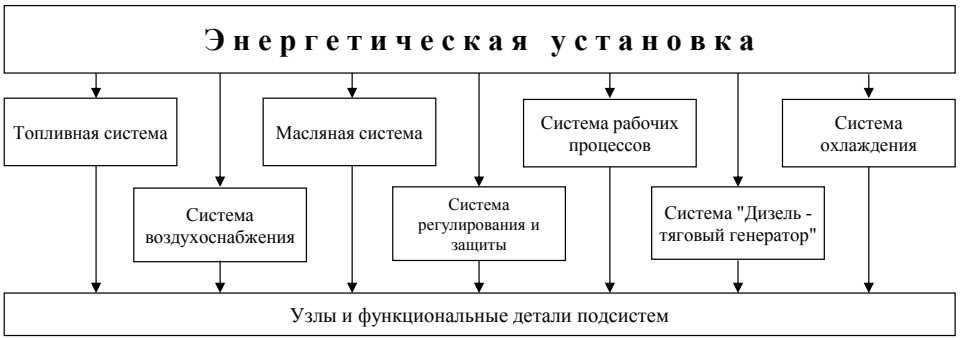


Рисунок 1 – Функциональные подсистемы энергетической установки

Организация достоверной оценки технического состояния функциональных подсистем энергетической установки осложняется необходимостью включения в процедуру идентификации фактического состояния значительного числа разнородных физических величин, признаков и их параметров, отражающих функциональные процессы и взаимодействия различных узлов и деталей подсистем, которые необходимо обрабатывать комплексно. Такое количество информации может трактоваться неоднозначно, что способствует возникновению ошибок первого и второго рода [1]. Поэтому возникает необходимость выделить наиболее значимый информационно емкий признак, а именно выявить информативный обобщающий параметр состояния функциональных подсистем энергетической установки. Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что процесс постепенного изменения уровня работоспособности, характеризуемый многими компонентами (физическими величинами, признаками, параметрами), описывается одномерной функцией $B_{\Sigma}(t)$, численные значения которой зависят от контролируемых компонентов процесса [2].

Для нахождения обобщающего параметра необходимо определить наиболее рациональную совокупность частных параметров технического состояния функциональных подсистем, которые затем свертываются к обобщенному. Наиболее строгим подходом к определению совокупности частных параметров является путь, основанный на построении и анализе модели исследуемого объекта.

Использование конкретной модели обусловливается спецификой рассматриваемого объекта. Функциональные подсистемы энергетической установки относятся к классу непрерывных объектов и характеризуются многоэлементной блочной структурой, значительной мощностью входных и выходных параметров, упорядоченностью связей и разнородностью процессов функционирования. Одним из путей математического описания подобных сложных объектов представляется путь составления граф-модели [3 – 6]. Функционирующий сложный объект представляется топологическим пространством и изображается в виде графа, отобра-

жающего существенные свойства функционирования объекта и множество взаимосвязей его параметров. Под топологическим пространством понимается пара $T = (X, \Theta)$, где X – конечное абстрактное множество $X = \{x_1, ..., x_l\}$; Θ – топология, определенная в множестве X заданием на нем бинарного отношения φ, связывающего две точки – $x_i \, (x_i \in X)$ и $x_j \, (x_j \in X)$, причем $x_i \neq x_j$ [3, 7]. Реализацию предлагаемого подхода рассмотрим на примере топливной системы.

Функциональная блок-схема топливной системы тепловозного дизеля [8] представлена на рисунке 2, где $T_о$ – температура окружающей среды; $T_{ТБ}$ – температура топлива в топливном баке (ТБ); $h_{ТБ}$ – уровень топлива в ТБ; $G_{ТБ}$ – количество топлива, забираемого из ТБ; $H_{ф.г}$ – давление потока топлива после фильтра грубой очистки (ФГО); $G_{ф.г}$ – количество топлива, проходящего через ФГО; $T_{ф.г}$ – температура топлива после ФГО; $n_{т.н}$ – частота вращения вала топливоподкачивающего насоса (ТПН); $P_{т.н}$ – давление топлива перед фильтром тонкой очистки (ФТО); $T_{т.н}$ – температура топлива после ТПН; $G_{т.н}$ – количество топлива, подведенного к ФТО; $P_{ф.т}$ – давление топлива после ФТО; $T_{ф.т}$ – температура топлива перед ФТО; $G_{ф.т}$ – количество топлива, прошедшего через ФТО; $P_{к.т}$ – давление топлива в надплунжерном пространстве ТНВД; $T_{КТ}$ – температура топлива в КТ; $G_{кт}$ – количество топлива, подведенного к топливному насосу высокого давления (ТНВД); $l_р$ – выход реек ТНВД; $n_д$ – частота вращения коленчатого вала дизеля; $P_{н.д}$ – давление топлива в трубопроводах высокого давления на входе в топливную форсунку (Ф); $G_{н.д}$ – цикловая подача топлива ТНВД; $T_{н.д}$ – температура топлива после ТНВД; $P_т$ – давление, впрыскиваемого в цилиндр, топлива; $q_ц$ – цикловая подача топлива; $T_т$ – температура впрыскиваемого топлива; $P'_{КТ}$ – давление топлива в топливном коллекторе (КТ); $G'_{КТ}$ – количество топлива, поступающего в КТ; $P'_{т.н}$ – давление топлива после ТПН; $G'_{т.н}$ – производительность ТПН; $G_{ПК}$ – количество топлива, сливаемого через предохранительный клапан (ПК); $G_{Пр.К}$ – количество топлива, сливаемого через перепускной клапан (ПрК); $T'_{ТП}$ – температура топлива на входе в ТП; $G_{в.п}$ – количество воды, проходящей через топливоподогреватель (ТП); $P_{в.п}$ – давление потока воды на входе в ТП; $T_{в.п}$ – температура воды на входе в ТП; $T'_{в.п}$ – температура воды на выходе из ТП; $P'_{в.п}$ – давление воды на выходе из ТП; $G_{ТП}$ – количество топлива, сливаемого в ТБ из ТП; $T_{ТП}$ – температура топлива на выходе из ТП.

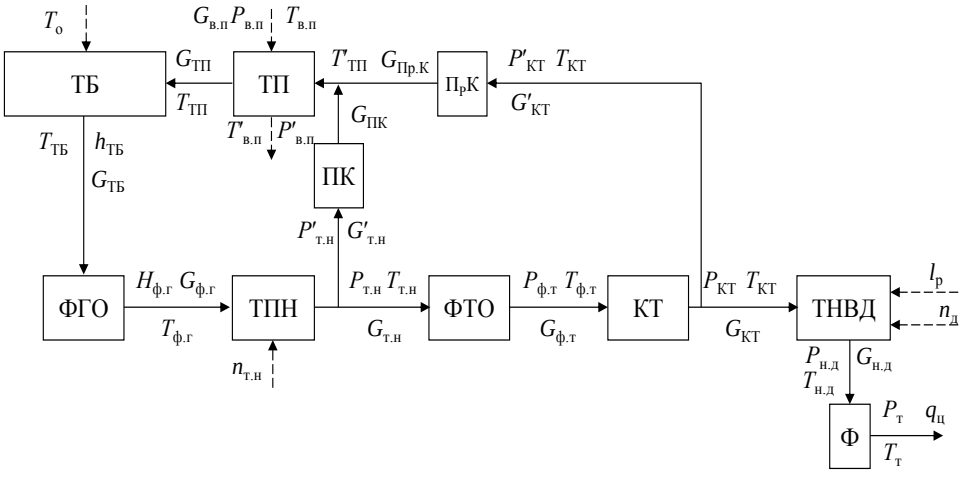


Рисунок 2 – Функциональная блок-схема топливной системы:

Составление модели функционирования топливной системы тепловозного дизеля $G_{т.с}(X, U)$ с использованием метода граф-описания предполагает задание в топологическом пространстве конечного множества функциональных параметров, образующих конечное множество вершин графа X, соответствующих причинно-следственных связей между ними,

образующих конечное множество ребер U ($X \cap U = \varnothing$) и трехместного предиката $P(x, u, y)$, $x, y \in X$ и $u \in U$ [3, 7].

В работе [3] к выделению рекомендованы следующие конечные множества параметров: входные параметры (множество K) – параметры воздействий других объектов или окружающей среды; выходные параметры (множество R) – параметры рассматриваемого объекта, воздействующие на другие объекты и системы; параметры процесса функционирования (множество F) – характеристики множества подпроцессов, составляющих основной процесс функционирования топливной системы; структурные параметры (множество E) и дефекты (множество D). Выделим параметры указанных множеств на основе рассмотрения физических процессов, отражающих сущность функционирования топливной системы и работоспособность ее структурных элементов.

В качестве входных параметров (множество K) в соответствии с функциональной блок-схемой (см. рисунок 2) рассматриваются температура окружающего воздуха; выход рейки топливного насоса и частота вращения коленчатого вала дизеля – $l_р$ и $n_д$; температура, давление и расход воды ТП – $T_{вп}$, $P_{вп}$ и $G_{вп}$; частота вращения привода ТПН – $n_{ТПН}$. Основными выходными характеристиками процесса функционирования топливной системы (множество R) служат цикловая подача, температура и давление впрыска топлива – $q_{вп}$, $T_{вп}$ и $P_{вп}$.

Параметры множества F выделим на основе анализа подпроцессов функционирования. Межблочные взаимосвязи функциональных элементов топливной системы низкого давления можно охарактеризовать уравнением Бернулли для реальной жидкости, которое для рассматриваемой системы запишется в виде [9, 10]:

$$z_{тi} + P_{тi}/(\rho_т g) + (\alpha_i \upsilon_{тi}^2)/(2g) = z_{тj} + P_{тj}/(\rho_т g) + (\alpha_j \upsilon_{тj}^2)/(2g) + h_{i-j}, \quad (1)$$

где $z_{тi}$, $z_{тj}$ – высота расположения центра тяжести соответственно i-го и j-го сечений потока над плоскостью сравнения (напор положения или уровень жидкости); $P_{тi}/(\rho_т g)$ – напор давления потока топлива; $(\alpha_i \upsilon_{тi}^2)/(2g)$ – скоростной напор потока топлива; h_{i-j} – потерянная удельная энергия потока или потеря напора топлива на участке $i - j$ (гидравлические потери напора); $\upsilon_т = G_т/\omega_т$ – средняя скорость топлива на участке; $P_т$ – давление в центре тяжести рассматриваемого сечения; $G_т$ – расход (поток) топлива; $\omega_т$ – живое сечение потока топлива; $\rho_т$ – плотность жидкости; α – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока.

Производительность ТПН является одним из важнейших параметров топливной системы тепловозного дизеля, которая характеризуется количеством массовой подачи топлива, проходящего через систему в единицу времени:

$$G_{т.н} = \mu_{т.н} C_{т.н} \rho_т n_{т.н}, \quad (2)$$

где $\mu_{т.н}$ – коэффициент подачи насоса; $C_{т.н}$ – постоянная для данного типа насоса; $\rho_т$ – плотность топлива, которая представляется функцией рабочей температуры топлива в ТБ; $n_{т.н}$ – частота вращения привода ТПН.

Фильтры тонкой и грубой очистки топлива ФТО и ФГО как элементы гидравлической цепи представляют собой местные сопротивления, для которых на основании уравнения Бернулли можно записать [9, 10]:

$$P_{т.ф} = P_{т.н} - \xi_{т.ф} \rho_т \upsilon_{т.ф}^2/2, \quad (3)$$

где $\xi_{т.ф}$ – коэффициент гидравлического сопротивления фильтра; $P_{т.н}$, $P_{т.ф}$ – соответственно давление до и после фильтра; $\rho_т$ – плотность топлива; $\upsilon_{т.ф}$ – средняя скорость топлива в фильтре.

Клапаны ПрК и ПК топливной системы представляют собой подпружиненные шарики, закрывающие отверстия для перепускания топлива. Потери напора на клапанах представляют собой потери в местных сопротивлениях [9, 10]:

$$h_{\text{кл}} = \xi_{\text{т.ф}}\, \rho_{\text{т}} \upsilon_{\text{т.ф}}^2 / 2 . \qquad (4)$$

Процесс формирования закона подачи топлива в топливной системе высокого давления определяется следующими основными параметрами: $P_{\text{т}}$, $u_{\text{т}}$, $\rho_{\text{т}}$ – давление, скорость движения и плотность топлива; $d_{\text{твд}}$ – внутренний диаметр нагнетательного трубопровода; $c_{\text{п}}$ – скорость плунжера; $f_{\text{и}}$ – площадь поперечного сечения иглы форсунки; $\tau_{\text{о}}$ – время движения плунжера на активной части хода; z – жесткость пружины иглы форсунки; $P_{\text{и}}$ – давление топлива под иглой при ее отрыве от седла; $P_{\text{о}}$ – давление среды в цилиндре дизеля; $f_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения нагнетательного клапана; y – величина подъема нагнетательного клапана; $\mu_{\text{в}}$ – коэффициент расхода для всасывающего окна; $\mu_{\text{о}}$ – коэффициент расхода отсечного окна; $\mu_{\text{с}}$ – коэффициент расхода эффективного сечения распылителя форсунки. Параметры $c_{\text{п}}$, $\tau_{\text{о}}$, $P_{\text{о}}$ определяют режим работы дизеля, $f_{\text{к}}$, $\mu_{\text{в}}$, $\mu_{\text{о}}$, y – техническое состояние ТНВД, а $f_{\text{и}}$, z, $\mu_{\text{с}}$ – техническое состояние форсунки.

Исходя из вышеизложенного основной цикл работы топливной системы отображаем множеством взаимосвязанных функциональных параметров (множество F), представляющих давление ($P_{\text{т.н}}$, $P_{\text{ф.т}}$, …, $P_{\text{к.т}}$), температуру ($T_{\text{ф.г}}$, $T_{\text{т.н}}$, …, $T_{\text{КТ}}$) и скорость движения сред ($\upsilon_{\text{ф.т}}$, …, $\upsilon_{\text{ф.г}}$), расход рабочих сред ($G_{\text{т.н}}$, $G_{\text{ПК}}$, …, $G_{\text{КТ}}$) и гидравлические потери напора ($h_{\text{ф.г}}$, $h_{\text{ф.т}}$, …, $h_{\text{ПК}}$), оказывающих наибольшее влияние на процесс течения потока топлива и его параметры.

Указанные выше параметры соответствуют режиму нормального функционирования, поэтому для распознавания возможных неисправностей необходимо ввести структурные параметры (множество E) и дефекты (множество D).

Глубина исследования в нашем случае распространяется до агрегатов и отдельных узлов топливной системы и не рассматривает ее отдельных элементов, поэтому описание структурных параметров подмножества E здесь и далее реализуем в терминах теории размытых категорий [3]: $E_{\text{ф.г}}$ – техническое состояние ФГО; $E_{\text{ТПН}}$ – техническое состояние ТПН; $E_{\text{ф.т}}$ – техническое состояние ФТО; $E_{\text{ПК}}$ и $E_{\text{Пр.К}}$ – техническое состояние ПК и ПрК; $E_{\text{КТ}}$ – техническое состояние КТ; $E_{\text{н.д}}$ – техническое состояние ТНВД; $E_{\text{ф}}$ – техническое состояние Ф. Множество структурных параметров отображается на графе в виде прообразов [3].

Параметры E_i выделили по следующим соображениям. Основываясь на анализе функциональной схемы и ее содержательного описания, можно констатировать, что в целом снижение давления на входе в ТНВД в эксплуатации может произойти вследствие увеличения перепада давления на ФТО в результате загрязнения фильтрующего элемента ($E_{\text{ф.т}}$), уменьшения производительности и давления, создаваемого топливоподкачивающим насосом, из-за износа его деталей ($E_{\text{ТПН}}$), загрязнении ФГО ($E_{\text{ф.г}}$), а также нарушениями в работе клапанов ПК и ПрК ($E_{\text{ПК}}$ и $E_{\text{Пр.К}}$). Техническое состояние топливной подсистемы высокого давления характеризуется техническим состоянием ТНВД и Ф ($E_{\text{н.д}}$ и $E_{\text{ф}}$). Возникающие в них неисправности ведут к изменению закона топливоподачи, что в конечном счете сказывается на надежности и экономичности тепловозного дизеля.

Каждый структурный параметр представляется возможным состоянием – дефектом, под которым понимаем несоответствие группы структурных параметров допустимым значениям. Число дефектов в структурных элементах топливной системы принимаем конечным и будем рассматривать как один обобщенный, влияющий на параметры E_i.

Составленная методом граф-описания модель нормального функционирования топливной системы тепловозного дизеля представлена на рисунке 3. Ориентированный граф $G_{\text{т.с}}$ в пространстве параметров является конечным и содержит вершины трех видов: стоковые (только входящие ребра), истоковые (только исходящие ребра) и смешанные (как входящие, так и исходящие ребра).

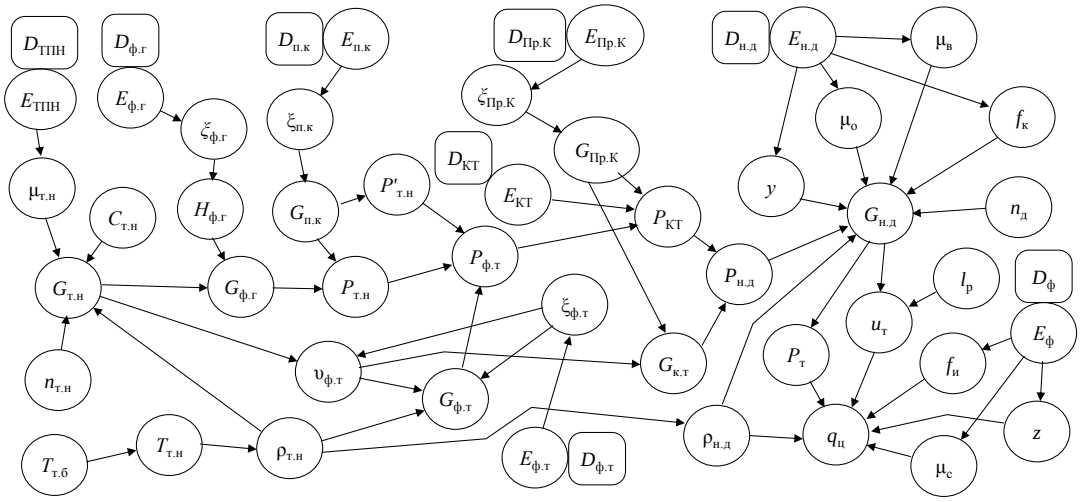


Рисунок 3 – Граф-модель топливной системы $G_{\text{т.с}}$

Полученная граф-модель топливной системы в пространстве параметров позволяет осуществить процедуру выбора частных параметров технического состояния. Для анализа полученных граф-моделей и установления наиболее рационального подмножества частных параметров (множества B) был применен метод покрытия таблицы расстояний [3, 4], который базируется на оценке элементов модели, упорядочивании вершин в соответствии со значением принятого показателя эффективности, нахождении маршрутов отображения дефектов в графе. Математически задача выделения совокупности частных параметров технического состояния решена нахождением внешне устойчивого подмножества (ВУПа) – T ориентированного двудольного графа, такого, что $T \subseteq X$ и истинно логическое высказывание $\forall_x [\, x \in X, x \notin T(\Gamma_x \cap T \neq \varnothing)]$, где Γ_x – подмножество, образованное отображением вершины x в множестве X; $\forall$ – квантор общности [3]. В результате получили схему покрытия в виде двудольного графа (рисунок 4), представляющую собой искомое множество частных параметров топливной системы.

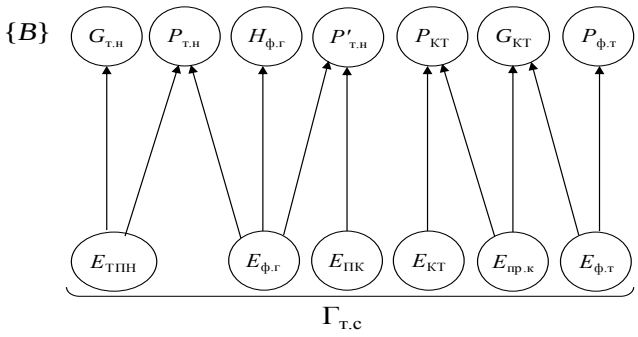


Рисунок 4 – Двудольный граф соответствия топливной системы

Исходя из того, что выделенные частные параметры технического состояния имеют различную размерность, они приводятся к единой системе безразмерного нормированного исчисления:

$$b'_i(t) = \frac{b_i(t) - b_{i\text{н}}}{b_{i\text{н}}}, \qquad (5)$$

где $b_i(t)$ – текущее значение i-го частного параметра; $b_{i\text{н}}$ – допустимое значение i-го частного параметра в соответствии с нормативной документацией.

Допуски на значения параметров $b_{i\text{н}}$ могут быть эксплуатационными или ремонтными. Эксплуатационные допуски устанавливаются системой эксплуатационно-технической документации, а также технологическими указаниями по выполнению регламентных работ. Ремонтные допуски определяются в ремонтной документации или в производственно-технологической документации.

В результате получаем совокупность безразмерных величин $\{G_{\text{т.н}}(t), P_{\text{т.н}}(t), H_{\text{ф.г}}(t), P'_{\text{т.н}}(t), P_{\text{КТ}}(t), G_{\text{КТ}}(t), P_{\text{ф.т}}(t)\}$, которые посредством математического выражения нелинейного среднего сводим к обобщенному параметру:

$$B_{\Sigma}(t)=\frac{\Phi_{G_{\text{т.н}}}\left[G_{\text{т.н}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{G_{\text{т.н}}}}}+\Phi_{P_{\text{т.н}}}\left[P_{\text{т.н}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{P_{\text{т.н}}}}}+\Phi_{H_{\text{ф.г}}}\left[H_{\text{ф.г}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{H_{\text{ф.г}}}}}+\Phi_{P'_{\text{т.н}}}\left[P'_{\text{т.н}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{P'_{\text{т.н}}}}}+}{\Phi_{G_{\text{т.н}}}+\Phi_{P_{\text{т.н}}}+\Phi_{H_{\text{ф.г}}}+\Phi_{P'_{\text{т.н}}}+} \tag{6}$$

$$\frac{+\Phi_{P_{\text{КТ}}}\left[P_{\text{КТ}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{P_{\text{КТ}}}}}+\Phi_{G_{\text{КТ}}}\left[G_{\text{кт}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{G_{\text{КТ}}}}}+\Phi_{P_{\text{ф.т}}}\left[P_{\text{ф.т}}(t)\right]^{\frac{1}{\Phi_{P_{\text{ф.т}}}}}}{+\Phi_{P_{\text{КТ}}}+\Phi_{G_{\text{КТ}}}+\Phi_{P_{\text{ф.т}}}},$$

где Φ_i – весовой коэффициент (линейная функция оценок каждого *i*-го частного параметра),

$$\Phi_i=\nu_{\theta}\,\theta_i+\nu_{\vartheta}\,\vartheta_i+\nu_{\sigma}\,\sigma_i, \tag{7}$$

здесь ν_{θ}, ν_{ϑ}, ν_{σ} – коэффициенты значимости; θ_i, ϑ_i, σ_i – относительные оценки частных параметров по показателям достоверности контроля, чувствительности и информативности.

Таким образом, свертывание совокупности безразмерных величин частных параметров технического состояния с использованием математического выражения нелинейного среднего позволяет получить одномерную функцию обобщенной параметрической оценки уровня работоспособности функциональных подсистем. Получаемый при этом информационно емкий признак удовлетворяет требованиям достоверности контроля, чувствительности и информативности. Кроме того, оценка уровня работоспособности по обобщенному параметру позволяет прогнозировать временную функцию $B_{\Sigma}(t)$, а следовательно, и характер изменения работоспособности во времени.

Выполненные исследования позволяют рекомендовать для выделения наиболее рациональной совокупности частных параметров функциональных подсистем применять аппарат теории графов. Использование метода граф-описания позволяет получить математическую модель функциональной подсистемы, а известный набор средств анализа топологического пространства – искомое множество частных параметров.

Список литературы

1. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст] / В. И. Бервинов / УМК МПС РФ. – М., 1998. – 193 с.

2. Машошин, О. Ф. Диагностика авиационной техники [Текст] / О. Ф. Машошин / Московский гос. техн. ун-т гражданской авиации. – М., 2007. – 141 с.

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

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

5. Сковородников, Е. И. Моделирование процессов функционирования дизель-генераторной установки тепловоза с целью оптимизации количества параметров контроля [Текст] / Е. И. Сковородников, В. А. Михеев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 1 (20). – С. 59 – 62.

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

7. Емеличев, В. А. Лекции по теории графов [Текст] / В. А. Емеличев, О. И. Мельников. – М.: Наука, 1990. – 383 с.

8. Тепловоз 2ТЭ116 [Текст] / С. П. Филонов, А. И. Гибалов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.

9. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

10. Чиняев, И. А. Судовые системы [Текст] / И. А. Чиняев. – М.: Транспорт, 1984. – 216 с.

References

1. Bervinov V. I. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie lokomotivov* (Technical diagnostics locomotives). Moscow: UMK MPS RF, 1998, 193 p.

2. Mashoshin O. F. *Diagnostika aviatsionnoi tekhniki* (Diagnosis of aeronautical engineering). Moscow, 2007, 141 p.

3. Osis Ia. Ia. *Diagnostirovanie na graf-modeliakh: Na primerakh aviatsionnoi i avtomobil'noi tekhniki* (Diagnosing on graph models: Examples of aviation and automotive technology). Moscow: Transport, 1991, 244 p.

4. Kharlamov V. V. *Metody i sredstva diagnostirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia kollektorno-shchetochnogo uzla tiagovykh elektrodvigatelei i drugikh kollektornykh mashin postoiannogo toka* (Methods and tools for diagnosing technical condition number of reflex-brush assembly traction motors and other collector cars post-direct current). Omsk, 2002, 233 p.

5. Skovorodnikov E. I., Mikheev V. A. [Modelirovanie protsessov funktsionirovaniia dizel'-generatornoi ustanovki teplovoza s tsel'iu optimizatsii kolichestva parametrov kontrolia]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2009, no. 1 (20), pp. 59 – 62.

6. Anisimov A. S., Mikheev V. A., Grishina Iu. B. Methods of interference parameters functioning locomotive [Metody issledovaniia vzaimovliianiia parametrov funktsionirovaniia teplovoza] *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 1 (1), pp. 2 – 8.

7. Emelichev V. A., Mel'nikov O. I. *Lektsii po teorii grafov* (Lectures on graph theory). Moscow: Nauka, 1990, 383 p.

8. Filonov S. P., Gibalov A. I. *Teplovoz 2TE116* (Locomotive 2TE116). Moscow: Transport, 1996, 334 p.

9. Shteinberga M. O. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam* (Handbook of hydraulic resistance). Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p.

10. Chiniaev I. A. *Sudovye sistemy* (Ship Systems). Moscow: Transport, 1984, 216 p.

УДК 629.4

В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Е. П. Челтыгмашев

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКИПАЖА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СО СТОРОНЫ ПУТИ

Сформирована математическая модель, описывающая динамику механической колебательной системы «железнодорожный экипаж – путь» в продольной вертикальной плоскости симметрии. Выполнено эквивалентное преобразование ее расчетной схемы. Рассмотрены способы линеаризации нелинейных характеристик. Сформирована модель «обобщенного» экипажа для оценки действующих на него ударных импульсов со стороны стыков рельсов.

Натурные испытания подвижного состава и практика его эксплуатации, особенно на дорогах Сибирского региона с повышенной жесткостью пути в зимнее время, показывают, что импульсное воздействие со стороны стыков рельсов оказывает значительное влияние на тяговые свойства локомотива, на работоспособность узлов его экипажной части, а также на надежность боковых рам грузовых вагонов, вызывая в них трещины и изломы, угрожающие безопасности движения поезда.

Задача исследования влияния импульсного воздействия на подвижной состав железных дорог является достаточно сложной, поэтому в работах [1 – 3] импульсное воздействие со стороны рельсового стыка на колесную пару рассматривалось без учета колебаний обрессоренных масс экипажа. Для оценки влияния обрессоренной массы и значений упругих и диссипативных параметров рессорного подвешивания на динамику узлов подвижного состава при импульсном воздействии пути требуется составить адекватную расчетную схему, необходимую для формирования математической модели движения железнодорожного экипажа.

Сделаем здесь несколько замечаний, касающихся составления расчетных схем подвижного состава и их математических моделей. Учитывая, что на российских железных дорогах укладка рельсов производится по наугольнику, возмущение, действующее на оба колеса при прохождении стыков рельсов, можно принять синхронным и синфазным. Второе замечание относится к расчетной схеме в продольной вертикальной плоскости симметрии, которая изображена на рисунке 1.

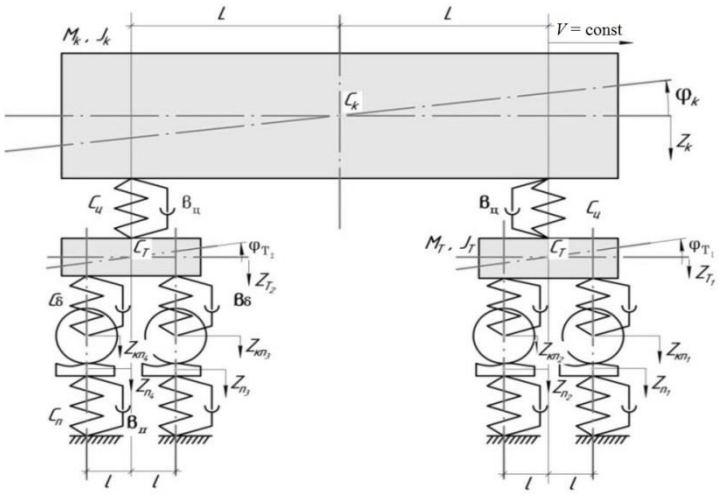


Рисунок 1 – Расчетная схема вертикальных колебаний железнодорожного экипажа

На этой схеме представлен симметричный обобщенный железнодорожный экипаж – пассажирский вагон с винтовыми цилиндрическими рессорами и гидравлическими гасителями колебаний в буксовой и центральной ступенях подвешивания, грузовой вагон на тележках модели 18-1711, у которого буксовую ступень подвешивания составляют полимерно-металлические амортизаторы шевронного типа, а центральную – типовой рессорный комплект, сухое трение в котором может быть заменено эквивалентным вязким, или электровоз с двухосными тележками, у которого центральную ступень рессорного подвешивания составляют винтовые цилиндрические пружины с параллельно подключенными гидродемпферами.

Обоснуем эквивалентность представления рессорного подвешивания кузова, показанного на рисунке 1, а также парциальной расчетной схемы кузова, которая приведена на рисунке 2. Составим соответствующие системы дифференциальных уравнений, пользуясь алгоритмом Лагранжа второго рода. Тогда коэффициенты демпфирования собственных колебаний и собственные частоты соответствующих дифференциальных уравнений должны быть, видимо, равными. Собственно из этого соображения мы и будем исходить.

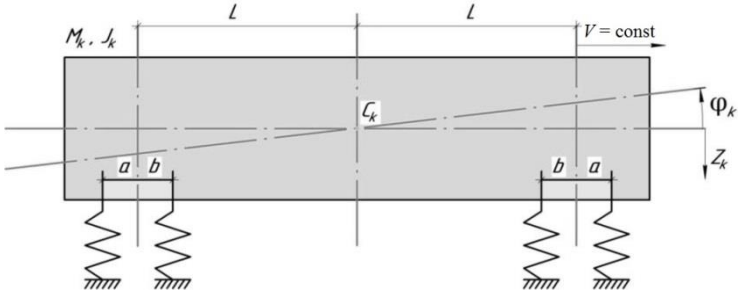


Рисунок 2 – Парциальная расчетная схема кузова железнодорожного экипажа

Кинетическая, потенциальная энергия и диссипативные функции для первой (см. рисунок 1), считая, что тележки неподвижны) и второй (см. рисунок 2) расчетных схем равны соответственно:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} M\dot{z}^2 + \frac{1}{2} J\dot{\varphi}^2; \\ \Pi = c\left(z^2 + L^2\varphi^2\right); \\ \Phi = \beta\left(\dot{z}^2 + L^2\dot{\varphi}^2\right); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} M\dot{z}^2 + \frac{1}{2} J\dot{\varphi}^2; \\ \Pi = \left(c_1 + c_2\right) z^2 + \left[c_1\left(L + a\right)^2 + c_2\left(L - b\right)^2\right]\varphi^2; \\ \Phi = \beta\left(\dot{z}^2 + L^2\dot{\varphi}^2\right). \end{cases} \quad (2)$$

Используя далее алгоритм Лагранжа второго рода, найдем следующие дифференциальные уравнения свободных колебаний для первой и второй парциальных расчетных схем:

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2n_z\dot{z} + k_{0z}^2 z = 0; \\ \ddot{\varphi} + 2n_\varphi\dot{\varphi} + k_{0\varphi}^2\varphi = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2\tilde{n}_z\dot{z} + \tilde{k}_{0z}^2 z = 0; \\ \ddot{\varphi} + 2\tilde{n}_\varphi\dot{\varphi} + \tilde{k}_{0\varphi}^2\varphi = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Эквивалентность данных расчетных схем возможна только при выполнении следующих условий:

$$\begin{cases} 2n_z = 2\tilde{n}_z;\ k_{0z}^2 = \tilde{k}_{0z}^2; \\ 2n_\varphi = 2\tilde{n}_\varphi;\ k_{0\varphi}^2 = \tilde{k}_{0\varphi}^2. \end{cases} \quad (5)$$

Из выражений (5) нетрудно установить, что при креплении гидравлических демпферов для первой и для второй расчетных схем в точках, где проходят размерные линии равных баз кузовов, имеющих одинаковые массу и геометрические размеры, коэффициенты демпфирования для первой и второй парциальных систем выполняются автоматически, т. е. тождественно. Из равенства парциальных частот подсистем следует, что

$$\begin{cases} c = c_1 + c_2; \\ cL^2 = c_1\left(L + a\right)^2 + c_2\left(L - b\right)^2. \end{cases} \quad (6)$$

Раскрывая во втором уравнении системы (6) квадраты круглых скобок и учитывая при этом первое соотношение, получаем такое алгебраическое уравнение, связывающее между собой величины *a* и *b* при условии, что база *L* нам уже задана:

$$2L\left(a - b\right) + a^2 + b^2 = 0. \quad (7)$$

Это уравнение выведено при условии, что $c_1 = c_2$. Разрешим уравнение (7) относительно переменной *b* и получим:

$$\begin{cases} b_1 = L\left(1+\sqrt{1-2\mu-\mu^2}\right); \\ b_2 = L\left(1-\sqrt{1-2\mu-\mu^2}\right). \end{cases} \quad (8)$$

Здесь обозначено $\mu = a/L$. Эта переменная является малой величиной по сравнению с L, следовательно, нас будут удовлетворять оба корня системы (8). Таким образом, жесткости должны быть равны: $c_1 = c_2 = c/2$, а соотношения размеров a и b могут быть любыми.

Вернемся к расчетной схеме (см. рисунок 1). Исследование динамики рельсовых железнодорожных экипажей обычно приводит к системам дифференциальных уравнений высокого порядка и если механическая система линейная или каким-либо способом линеаризована, то целесообразно воспользоваться векторно-матричной формой составления уравнений, которая позволяет свести задачу изучения динамических качеств подвижного состава к одному дифференциальному уравнению вида:

$$A\ddot{\bar{q}} + B\dot{\bar{q}} + C\bar{q} = D\ddot{\bar{\eta}} + E\dot{\bar{\eta}} + F\bar{\eta}, \quad (9)$$

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).

Рассмотрим способы линеаризации нелинейных характеристик. Один из них заключается в замене сухого трения эквивалентным вязким. Отметим, что в центральной ступени рефрижераторных вагонов применяются листовые рессоры. Элементы с сухим трением применяются также в тележках грузовых вагонов. Как широко принято в практике исследований динамических свойств подвижного состава [4 – 6], коэффициент эквивалентного вязкого трения вычисляется из условия равенства работы, совершаемой фрикционным гасителем элементом трения за один период колебаний, и работы, совершаемой гасителем вязкого трения за этот же период.

Второй способ был предложен профессором Батем М. И. [7]. Он исследовал динамическое поведение системы, в которой сопротивление гасителей сухого трения пропорционально их перемещениям, и получил эквивалентный коэффициент демпфирования колебания в виде:

$$n = \frac{4\ln\sqrt{\frac{1+\Psi}{1-\Psi}}\sqrt{\frac{c}{m}}}{\sqrt{\pi^2+\ln^2\sqrt{\frac{1+\Psi}{1-\Psi}}}}, \quad (10)$$

здесь $\psi = 0{,}08$ – коэффициент относительного трения рессорного комплекта грузового вагона; $\sqrt{c/m}$ – собственная частота системы.

Этот подход широко использовался профессором А. Я. Коганом [8] при исследовании воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. Поэтому данный способ линеаризации характеристики сухого трения будем считать основным и применять в своих исследованиях динамических качеств подвижного состава.

Далее покажем, как введением симметричных и антисимметричных координат разбить общую систему дифференциальных уравнений на отдельные подсистемы, имеющие, разумеется, разный порядок матриц, хотя их сумма будет по-прежнему равна исходному порядку,

т. е. 10. Итак, для обобщенной системы «экипаж – путь», показанной на рисунке 1, в первую очередь нужно установить число степеней свободы. Кузов и тележка, как плоские тела, обладают двумя степенями свободы, т. е. могут подпрыгивать и галопировать, тогда имеем 2 + 2·2 = 6, а колесная пара может только подпрыгивать, следовательно, все вместе дадут четыре степени свободы. В результате плоская расчетная схема «обобщенного» экипажа будет иметь 10 степеней свободы.

В соответствии с заданным числом степеней свободы выберем 10 обобщенных координат, которые однозначным образом определяют положение железнодорожного экипажа на плоскости и приведены на рисунке 1.

Теперь, следуя энергетическому алгоритму Лагранжа, перейдем к вычислению кинетической энергии, которая слагается из кинетических энергий подпрыгивания и галопирования кузова и тележек, кинетических энергий подпрыгивания колесных пар и «приведенных» масс пути. В результате имеем

$$T = \frac{1}{2} M_{\text{к}} \dot{z}_k^2 + \frac{1}{2} J_{\text{к}} \dot{\varphi}_k^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{2} \left(M_{\text{т}} \dot{z}_{\text{т}}^2 + J_{\text{т}} \dot{\varphi}_{\text{т}}^2 \right) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{4} m_{\text{к.п}} \dot{z}_{\text{к.п}\,j}^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{4} m_{\text{п}} \dot{z}_{\text{п}\,j}^2, \tag{11}$$

или, с учетом гипотезы о безотрывном движении колесных пар по рельсам:

$$z_{\text{к.п}} = z_{\text{п}} + \eta; \;\; \dot{z}_{\text{к.п}} = \dot{z}_{\text{п}} + \dot{\eta}, \tag{12}$$

откуда следует, что

$$\dot{z}_{\text{п}} = \dot{z}_{\text{к.п}} - \dot{\eta}. \tag{13}$$

Тогда после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} 2T = M_{\text{к}} \dot{z}_{\text{к}}^2 + J_{\text{к}} \dot{\varphi}_{\text{к}}^2 + \sum_{j=1}^{2} \left(M_{\text{т}} \dot{z}_{\text{т}\,j}^2 + J_{\text{т}} \dot{\varphi}_{\text{т}\,j}^2 \right) + \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}} \right) \sum_{j=1}^{4} \dot{z}_{\text{к.п}\,j}^2 - \\ -2 m_{\text{п}} \sum_{j=1}^{4} \dot{z}_{\text{к.п}\,j} \dot{\eta}_j + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \sum_{j=1}^{4} \dot{\eta}_j^2. \end{aligned} \tag{14}$$

Последнее слагаемое в выражении (13) можно было опустить, ибо оно не определяется обобщенными координатами, по которым мы затем будем брать частные производные.

Потенциальная энергия «обобщенного» экипажа при условии, что его обобщенные координаты отсчитываются от положения статического равновесия (собственно, поэтому на рисунке 1 и не представлены силы тяжести кузова, тележек и колесных пар экипажа), определяется как сумма потенциальных энергий, запасенных в упругих элементах подвешивания «обобщенного» экипажа, т. е. в центральном и буксовом подвешивании и на железнодорожном пути, по формуле:

$$2\Pi = c_{\text{ц}} \sum_{j=1}^{2} \Delta_{\text{ц}\,j}^2 + c_{\text{б}} \sum_{j=1}^{4} \Delta_{\text{б}\,j}^2 + c_{\text{п}} \sum_{j=1}^{4} \Delta_{\text{п}\,j}^2, \tag{15}$$

здесь $\Delta_{\text{ц}\,j}$, $\Delta_{\text{б}\,j}$, $\Delta_{\text{п}\,j}$ – деформации упругих элементов соответственно центрального, буксового подвешиваний и железнодорожного пути при безотрывном движении по нему колесной пары, равные:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{ц1}} = z_k - z_{\text{т1}} - L\varphi_k; \\ \Delta_{\text{ц2}} = z_k - z_{\text{т2}} + L\varphi_k; \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} \Delta_{б1} = z_{т1} - z_{к.п1} - l\varphi_{т1}; \\ \Delta_{б2} = z_{т1} - z_{к.п2} + l\varphi_{т1}; \\ \Delta_{б3} = z_{т2} - z_{к.п3} - l\varphi_{т2}; \\ \Delta_{б4} = z_{т2} - z_{к.п4} + l\varphi_{т2}; \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} \Delta_{п1} = z_{к.п1} - \eta_1; \\ \Delta_{п2} = z_{к.п2} - \eta_2; \\ \Delta_{п3} = z_{к.п3} - \eta_3; \\ \Delta_{п4} = z_{к.п4} - \eta_4. \end{cases} \tag{18}$$

Здесь сделаем одно замечание, касающееся выражения (15). Так, при вычислении прогибов пружин центрального подвешивания экипажа мы не приняли во внимание высоту центра масс кузова, которая по сравнению с его базой, что особенно характерно для фитинговых платформ контейнерных поездов, обращающихся по Транссибирскому коридору «Восток – Запад», является малой величиной и поэтому была отброшена, поэтому полученное выражение (15) является приближенным. Подстановка найденных выше деформаций упругих элементов локомотива в потенциальную энергию приводит ее к виду:

$$\begin{aligned} 2\Pi = c_{ц}\left[2z_k^2 + 2L^2\varphi_k^2 + \sum_{j=1}^{2} z_{т\,j}^2 - 2z_k \sum_{j=1}^{2} z_{т\,j} + 2L\varphi_k \sum_{j=1}^{2} (-1)^{j+1} z_{т\,j}\right] + \\ + c_{б}\left[2\sum_{j=1}^{2} z_{т\,j}^2 + \sum_{j=1}^{4} z_{к.п\,j}^2 - 2z_{т1}\sum_{j=1}^{2} z_{к.п\,j} - 2z_{т2}\sum_{j=3}^{4} z_{к.п\,j} + l\varphi_{т1}\sum_{j=1}^{2}(-1)^{j+1} z_{к.п\,j} + \right. \\ \left. + l\varphi_{т2}\sum_{j=3}^{4}(-1)^{j+1} z_{к.п\,j}\right] + c_{п}\sum_{j=1}^{4}\left(z_{к.п\,j} - \eta_j\right)^2. \end{aligned} \tag{19}$$

Диссипативная функция, или функция рассеяния, вычисляется по выражению:

$$2\Phi = \beta_{ц}\sum_{j=1}^{2}\dot{\Delta}_{ц\,j}^2 + \beta_{б}\sum_{j=1}^{4}\dot{\Delta}_{б\,j}^2 + \beta_{п}\sum_{j=1}^{4}\dot{\Delta}_{п\,j}^2, \tag{20}$$

где скорости деформации диссипативных элементов таковы:

для центрального подвешивания экипажа –

$$\begin{cases} \dot{\Delta}_{ц1} = \dot{z}_k - \dot{z}_{т1} - L\dot{\varphi}_k; \\ \dot{\Delta}_{ц2} = \dot{z}_k - \dot{z}_{т2} + L\dot{\varphi}_k; \end{cases} \tag{21}$$

для буксового подвешивания экипажа –

$$\begin{cases} \dot{\Delta}_{б1} = \dot{z}_{т1} - \dot{z}_{к.п1} - l\dot{\varphi}_{т1}; \\ \dot{\Delta}_{б2} = \dot{z}_{т1} - \dot{z}_{к.п2} + l\dot{\varphi}_{т1}; \\ \dot{\Delta}_{б3} = \dot{z}_{т2} - \dot{z}_{к.п3} - l\dot{\varphi}_{т2}; \\ \dot{\Delta}_{б4} = \dot{z}_{т2} - \dot{z}_{к.п4} + l\dot{\varphi}_{т2}; \end{cases} \tag{22}$$

для железнодорожного пути при безотрывном движении по нему колесной пары –

$$\begin{cases} \dot{\Delta}_{\text{п}1} = \dot{z}_{\text{к.п}1} - \dot{\eta}_1; \\ \dot{\Delta}_{\text{п}2} = \dot{z}_{\text{к.п}2} - \dot{\eta}_2; \\ \dot{\Delta}_{\text{п}3} = \dot{z}_{\text{к.п}3} - \dot{\eta}_3; \\ \dot{\Delta}_{\text{п}4} = \dot{z}_{\text{к.п}4} - \dot{\eta}_4; \end{cases} \tag{23}$$

Внесение скоростей деформирования диссипативных элементов в функцию рассеяния приводит выражение (20) к окончательному виду:

$$\begin{aligned} 2\Phi = \beta_{\text{ц}} \Bigg[2\dot{z}_k^2 + 2L^2\dot{\varphi}_k^2 + \sum_{j=1}^{2} \dot{z}_{\text{т}j}^2 - 2\dot{z}_k \sum_{j=1}^{2} \dot{z}_{\text{т}j} + 2L\dot{\varphi}_k \sum_{j=1}^{2} (-1)^{j+1} \dot{z}_{\text{т}j} \Bigg] + \\ + \beta_{\text{б}} \Bigg[2\sum_{j=1}^{2} \dot{z}_{\text{т}j}^2 + \sum_{j=1}^{4} \dot{z}_{\text{к.п}j}^2 - 2\dot{z}_{\text{т}1} \sum_{j=1}^{2} \dot{z}_{\text{к.п}j} - 2\dot{z}_{\text{т}2} \sum_{j=3}^{4} \dot{z}_{\text{к.п}j} + l\dot{\varphi}_{\text{т}1} \sum_{j=1}^{2} (-1)^{j+1} \dot{z}_{\text{к.п}j} + \\ + l\dot{\varphi}_{\text{т}2} \sum_{j=3}^{4} (-1)^{j+1} \dot{z}_{\text{к.п}j} \Bigg] + \beta_n \sum_{j=1}^{4} \left(\dot{z}_{\text{к.п}j} - \dot{\eta}_j \right)^2. \end{aligned} \tag{24}$$

Применяя уравнения Лагранжа второго рода, в итоге получим систему из десяти дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами, описывающую соответствующие колебания узлов железнодорожного экипажа (кузова, тележек и колесных пар вагона):

$$\begin{cases} M_{\text{к}}\ddot{z}_k + 2\beta_{\text{ц}}\dot{z}_k - \beta_{\text{ц}}\dot{z}_{\text{т}1} - \beta_{\text{ц}}\dot{z}_{\text{т}2} + 2c_{\text{ц}}z_k - c_{\text{ц}}z_{\text{т}1} - c_{\text{ц}}z_{\text{т}2} = 0; \\ J_{\text{к}}\ddot{\varphi}_k + 2\beta_{\text{ц}}L^2\dot{\varphi}_k + \beta_{\text{ц}}L\dot{z}_{\text{т}1} - \beta_{\text{ц}}L\dot{z}_{\text{т}2} + 2c_{\text{ц}}L^2\varphi_k + c_{\text{ц}}Lz_{\text{т}1} - c_{\text{ц}}Lz_{\text{т}2} = 0; \\ M_{\text{т}}\ddot{z}_{\text{т}1} - \beta_{\text{ц}}\dot{z}_k + \beta_{\text{ц}}L\dot{\varphi}_k + \left(\beta_{\text{ц}} + 2\beta_{\text{б}}\right)\dot{z}_{\text{т}1} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{к.п}1} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{к.п}2} - \\ -c_{\text{ц}}z_k + c_{\text{ц}}L\varphi_k + \left(c_{\text{ц}} + 2c_{\text{б}}\right)z_{\text{т}1} - c_{\text{б}}z_{\text{к.п}1} - c_{\text{б}}z_{\text{к.п}2} = 0; \\ J_{\text{т}}\ddot{\varphi}_{\text{т}1} + 2\beta_{\text{б}}l^2\dot{\varphi}_{\text{т}1} + \beta_{\text{б}}l\dot{z}_{\text{к.п}1} - \beta_{\text{б}}l\dot{z}_{\text{к.п}2} + 2c_{\text{б}}l^2\varphi_{\text{т}1} + c_{\text{б}}lz_{\text{к.п}1} - c_{\text{б}}lz_{\text{к.п}2} = 0; \\ M_{\text{т}}\ddot{z}_{\text{т}2} - \beta_{\text{ц}}\dot{z}_k - \beta_{\text{ц}}L\dot{\varphi}_k + \left(\beta_{\text{ц}} + 2\beta_{\text{б}}\right)\dot{z}_{\text{т}2} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{к.п}3} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{к.п}4} - \\ -c_{\text{ц}}z_k - c_{\text{ц}}L\varphi_k + \left(c_{\text{ц}} + 2c_{\text{б}}\right)z_{\text{т}2} - c_{\text{б}}z_{\text{к.п}3} - c_{\text{б}}z_{\text{к.п}4} = 0; \\ J_{\text{т}}\ddot{\varphi}_{\text{т}2} + 2\beta_{\text{б}}l^2\dot{\varphi}_{\text{т}2} + \beta_{\text{б}}l\dot{z}_{\text{к.п}3} - \beta_{\text{б}}l\dot{z}_{\text{к.п}4} + 2c_{\text{б}}l^2\varphi_{\text{т}2} + c_{\text{б}}lz_{\text{к.п}3} - c_{\text{б}}lz_{\text{к.п}4} = 0; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{z}_{\text{к.п}1} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{т}1} + \beta_{\text{б}}l\dot{\varphi}_{\text{т}1} + \left(\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_{\text{к.п}1} - c_{\text{б}}z_{\text{т}1} + c_{\text{б}}l\varphi_{\text{т}1} + \\ + \left(c_{\text{б}} + c_{\text{п}}\right)z_{\text{к.п}1} = m_{\text{п}}\ddot{\eta}_1 + \beta_{\text{п}}\dot{\eta}_1 + c_{\text{п}}\eta_1; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{z}_{\text{к.п}2} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{т}1} - \beta_{\text{б}}l\dot{\varphi}_{\text{т}1} + \left(\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_{\text{к.п}2} - c_{\text{б}}z_{\text{т}1} - c_{\text{б}}l\varphi_{\text{т}1} + \\ + \left(c_{\text{б}} + c_{\text{п}}\right)z_{\text{к.п}2} = m_{\text{п}}\ddot{\eta}_2 + \beta_{\text{п}}\dot{\eta}_2 + c_{\text{п}}\eta_2; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_n\right)\ddot{z}_{\text{к.п}3} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{т}2} + \beta_{\text{б}}l\dot{\varphi}_{\text{т}2} + \left(\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_{\text{к.п}3} - c_{\text{б}}z_{\text{т}2} + c_{\text{б}}l\varphi_{\text{т}2} + \\ + \left(c_{\text{б}} + c_{\text{п}}\right)z_{\text{к.п}3} = m_{\text{п}}\ddot{\eta}_3 + \beta_{\text{п}}\dot{\eta}_3 + c_{\text{п}}\eta_3; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{z}_{\text{к.п}4} - \beta_{\text{б}}\dot{z}_{\text{т}2} - \beta_{\text{б}}l\dot{\varphi}_{\text{т}2} + \left(\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{z}_{\text{к.п}4} - c_{\text{б}}z_{\text{т}2} - c_{\text{б}}l\varphi_{\text{т}2} + \\ + \left(c_{\text{б}} + c_{\text{п}}\right)z_{\text{к.п}4} = m_{\text{п}}\ddot{\eta}_4 + \beta_{\text{п}}\dot{\eta}_4 + c_{\text{п}}\eta_4. \end{cases} \tag{25}$$

Анализ системы дифференциальных уравнений (25) для плоского «обобщенного» экипажа указывает на то, что возмущающим воздействием являются геометрические неровности на поверхности катания рельсов, которые обычно принимаются равными для левого и право-

го рельсов железнодорожного пути. Уравнения (25) по своей структуре линейные, и поэтому можно легко составить их характеристическое уравнение, имеющее кратные корни для тележек второй, а для колесных пар четвертой степени кратности.

Чтобы упростить систему уравнений (25), введем симметричные координаты

$$\begin{cases} \tilde{z}_{\text{т}} = z_{\text{т1}} + z_{\text{т2}}; \;\; \dot{\tilde{z}}_{\text{т}} = \dot{z}_{\text{т1}} + \dot{z}_{\text{т2}}; \\ \tilde{z}_{\text{к.п}} = \sum\limits_{j=1}^{4} z_{\text{к.п}\,j}; \;\; \dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} = \sum\limits_{j=1}^{4} \dot{z}_{\text{к.п}\,j} \end{cases} \tag{26}$$

и после необходимых преобразований получим такую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M_{\text{к}}\ddot{z}_k + 2\beta_{\text{ц}}\dot{z}_k - \beta_{\text{ц}}\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} + 2c_{\text{ц}}z_k - c_{\text{ц}}\tilde{z}_{\text{т}} = 0; \\ M_{\text{т}}\ddot{\tilde{z}}_{\text{т}} - 2\beta_{\text{ц}}\dot{z}_k + \left(\beta_{\text{ц}} + 2\beta_{\text{б}}\right)\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} - \beta_{\text{б}}\dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} - 2c_{\text{ц}}z_k + \left(c_{\text{ц}} + 2c_{\text{б}}\right)\tilde{z}_{\text{т}} - c_{\text{б}}\tilde{z}_{\text{к.п}} = 0; \\ \left(m_{\text{к.п}} + m_{\text{п}}\right)\ddot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} - 2\beta_{\text{б}}\dot{\tilde{z}}_{\text{т}} + \left(\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}\right)\dot{\tilde{z}}_{\text{к.п}} - 2c_{\text{б}}\tilde{z}_{\text{т}} + \left(c_{\text{б}} + c_{\text{п}}\right)\tilde{z}_{\text{к.п}} = \\ = m_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{4}\ddot{\eta}_j + \beta_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{4}\dot{\eta}_j + c_{\text{п}}\sum\limits_{j=1}^{4}\eta_j. \end{cases} \tag{27}$$

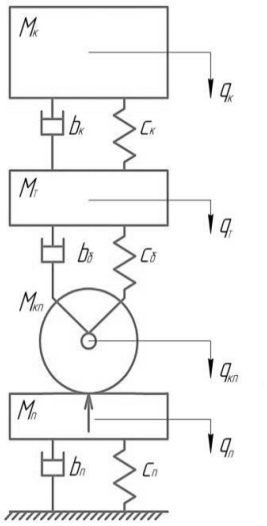


Рисунок 3 – Расчетная схема обобщенного железнодорожного экипажа

Отметим, что полученная система дифференциальных уравнений значительно проще исходной (25), при этом она обладает характеристическим уравнением с простыми корнями, следовательно, собственные частоты колебаний подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары будут точными. Еще одно замечание касается сходства, если не обращать внимания на обозначения дифференциальных уравнений условного одноосного «обобщенного» экипажа с двумя ступенями подвешивания и выделенной подсистемы. Следовательно, такую модель механической колебательной системы «экипаж – путь» можно считать корректно обоснованной.

Другими словами, полагаем, что существует так называемый «обобщенный экипаж», который представляется в виде системы твердых тел, пружин и демпферов сухого или вязкого трения (рисунок 3).

Вполне естественно, что здесь мы воспользовались дискретной инерционной моделью железнодорожного пути, ибо она является достаточно простой, но обеспечивает необходимую точность (этот факт установлен во многих работах как теоретическими расчетами, так и экспериментально). Здесь приняты следующие обозначения: M_k, M_T, M_{kp}, M_p – массы кузова, тележки, масса колесной пары и «приведенная» масса железнодорожного пути соот-ветственно, тс·с^2/м; C_k, C_b, C_p – жесткости центрального, буксового подвешиваний и жесткость пути, которую исходя из условий нашего исследования будем считать постоянной, тс/м; b_k, b_b, b_p – коэффициенты эквивалентного вязкого трения кузовного, буксового подвешивания и пути, тс·с/м. Все величины, указанные выше, рассчитываются либо на одну колесную пару, либо на одно колесо.

Список литературы

1. Тележечные экипажи локомотивов для повышенных скоростей движения [Текст] / Науч. тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 248. – 304 с.

2. Пахомов, М. П. Оценка уровня импульсного воздействия со стороны рельсовых стыков на колесо локомотива [Текст] / М. П. Пахомов, Н. П. Буйнова, И. И. Галиев // Взаимодей-

ствие подвижного состава и пути, динамика локомотивов // Труды Омского ин-та инж. ж.-д. трансп. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1971. – Т. 128. – С. 9 – 16.

3. Meshcherjakov V. Shock Interaction of a Wheel–Couple with a Railway [Text] / Proceedings of the 2nd Miniconference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems. Budapest, 1996. – P. 62 – 68.

4. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

5. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. А. Камаев. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.

6. Вершинский, С. В. Динамика вагона [Текст] / С. В. Вершинский. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

7. Бать, М. И. Вынужденные колебания в системе с гистерезисом [Текст] // Прикладная математика и механика / М. И. Бать / АН СССР. – М., 1940. – Т. 4. – Вып. 3. – С. 13 – 30.

8. Коган, А. Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную нагрузку [Текст] / А. Я. Коган // Науч. тр. ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М., 1973. – Вып. 502. – 243 с.

References

1. Wagon crews locomotives for high speeds [Telezhechnye ekipazhi lokomotivov dlia povyshennykh skorostei dvizheniia]. *Nauchnye trudy VNIIZhTa – Proceedings VNIIZhT*, 1962, no. 248, 304 p.

2. Pakhomov M. P., Buinova N. P., Galiev I. I. Assessment of the level of exposure to pulsed rail sty-ing wheel locomotive [Otsenka urovnia impul'snogo vozdeistviia so storony rel'sovykh stykov na koleso lokomotiva]. *Trudy Omskogo instituta in-zhenerov zheleznodorozhnogo transporta – Proceedings of the Institute of Omsk Institute engineers have rail transport*, 1971, T. 128, pp. 9 – 16.

3. Meshcherjakov V. Shock Interaction of a Wheel–Couple with a Railway (Proceedings of the 2nd Miniconference on Contact Mechanics and Wear of Rail). – Budapest, 1996, pp. 62 – 68.

4. Verigo M. F. *Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava* (Interaction track and rolling stock). Moscow: Transport, 1986, 559 p.

5. Kamaev V. A. *Optimizatsiia parametrov khodovykh chastei zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Optimization parameters undercarriages of railway rolling stock). Moscow: Mashinostroenie, 1980, 215 p.

6. Vershinskii S. V. Dinamika vagona (Dynamics of the car). Moscow: Transport, 1991, 360 p.

7. Bat' M. I. Forced oscillations in a system with hysteresis [Vynuzhdennye kolebaniia v sisteme s gisterezisom]. *Prikladnaia matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*, 1940, T. 4, no. 3, pp. 13 – 30.

8. Kogan A. Ia. Calculations of railway track in the vertical load [Raschety zheleznodorozhnogo puti na vertikal'nuiu nagruzku]. *Nauchnye trudy VNIIZhTa – Proceedings VNIIZhT*, 1973, no. 502, 243 p.

УДК 629.4.027.4

А. В. Обрывалин, Н. А. Кваскова

ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ВАГОННЫХ КОЛЕС, ПОСТУПАЮЩИХ В РЕМОНТ С ДЕФЕКТАМИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В статье рассматривается вопрос о возможности продления срока службы вагонных колес путем влияния на технологические параметры восстановления их профиля катания. Выполнен корреляционный анализ статистических данных по объемам механической обработки и величине дефектов на поверхности катания

колес, поступающих в ремонт. Предложен механизм назначения припуска на механическую обработку профиля катания колеса, который позволит сократить необоснованный расход металла обода колеса в стружку.

Известно, что срок службы вагонных колес зависит главным образом от степени их повреждаемости (изнашивания) в эксплуатации. Все дефекты вагонных колес можно по технологическому признаку разделить на две группы: не устраняемые (браковочные) и устраняемые в ремонтном производстве. В свою очередь устраняемые дефекты делятся на износы (равномерный и неравномерный прокат профиля катания колеса, вертикальный подрез гребня, тонкий гребень и т. п.) и повреждения (ползуны, выщербины, навары и т. п.). При выявлении на поверхности катания колеса указанных дефектов, достигших браковочных размеров, нормы которых приведены в инструкции по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации ЦВ-ЦЛ-408, выполняется отцепка вагона для выкатки из-под него колесной пары с колесом, содержащим дефект. Для устранения дефектов с поверхности катания колеса и восстановления работоспособности колесной пары производят обточку профиля катания на колесотокарных станках. Количество возможных обточек вагонных колес не регламентировано и выполняется до тех пор, пока толщина обода не достигнет браковочной величины менее 35 мм. После этого колесную пару отправляют на переформирование элементов. Таким образом, количество возможных обточек колеса под ремонтный размер будет зависеть от двух факторов: во-первых, от размера (степени) повреждения или износа поверхности катания; а во-вторых, от величины припуска на механическую обработку. Если на первый фактор повлиять сложно, так как степень повреждения поверхности катания является случайной величиной, то на второй фактор можно влиять путем уменьшения или увеличения размера припуска на механическую обработку.

Припуск – слой металла, который необходимо снять с обрабатываемой заготовки для получения поверхности требуемой точности и шероховатости. В случае механической обработки колеса поверхность профиля катания поступившей в ремонт колесной пары будет являться поверхностью заготовки, а поверхность профиля катания после обработки – заданной поверхностью с определенными требованиями к точности и шероховатости. Таким образом, разность между диаметром колеса до обработки и после нее, разделенная пополам, и будет определять припуск на механическую обработку

В настоящее время в ремонтных вагонных депо отсутствует четкая отработанная методика назначения припуска на механическую обработку вагонного колеса. В качестве нормативно-технической документации в ремонтных вагонных депо при выполнении ремонта колесных пар используют типовой технологический процесс и ремонтную карточку, заполняемую на каждую колесную пару. Типовой технологический процесс не предусматривает указания режимов обработки (скорость резания, подача инструмента, глубина резания и количество проходов режущего инструмента), так как колесные пары поступают с разными дефектами и их размерами. В ремонтной карточке также данная информация не отражена, в ней указывается информация в большей степени учетного характера, а не технологического. Припуск на обработку назначает сам рабочий (токарь) исходя из своего производственного опыта. Это приводит к следующим негативным моментам. Назначение чрезмерно больших припусков приводит к потерям металла, расходуемого в стружку, что значительно сокращает срок службы вагонного колеса; к повышению расхода режущего инструмента и электрической энергии; к увеличению трудоемкости и себестоимости механической обработки. Кроме того, увеличение глубины резания при механической обработке колес сопровождается ростом упругих деформаций в технологической системе и образованием на поверхности катания колес макронеровностей. Назначение недостаточных размеров припуска не обеспечивает удаления дефектных слоев материала. Все это в дальнейшем процессе эксплуатации колеса является причиной зарождения и развития на поверхности катания дефектов усталостного происхождения (выщербин 2-го рода) и, как следствие, уменьшения пробега колесной пары между обточками [1].

Таким образом, оптимальное назначение припуска (необходимого и достаточного для обеспечения требований к точности и качеству поверхности) на механическую обработку является механизмом по продлению срока службы вагонных колес, т. е. между глубиной де-

фекта и припуском на механическую обработку должна наблюдаться тесная взаимосвязь. Для оценки ситуации, складывающейся в настоящее время, были собраны статистические данные из ремонтных и эксплуатационных вагонных депо. Выборка насчитывает 1000 колесных пар, изъятых из эксплуатации с такими дефектами, как ползун и выщербина на поверхности катания колеса.

Из статистических данных, приведенных на рисунках 1 и 2, видно, что для большинства колес припуск находится в интервале от 4 до 12 мм. Анализ данных в уточненном диапазоне (рисунок 3) показывает, что для серийных колес припуск находится в интервале 5 – 8 мм, а для колес повышенной твердости – в интервале 8 – 10 мм. Статистические данные эксплуатационных вагонных депо, представленные на рисунках 4 и 5, показывают, что большая часть колесных пар изымается из эксплуатации при наличии указанных выше дефектов, имеющих размер по глубине не более 2 мм.



Рисунок 1 – Распределение вагонных колес повышенной твердости, поступивших на механическую обработку

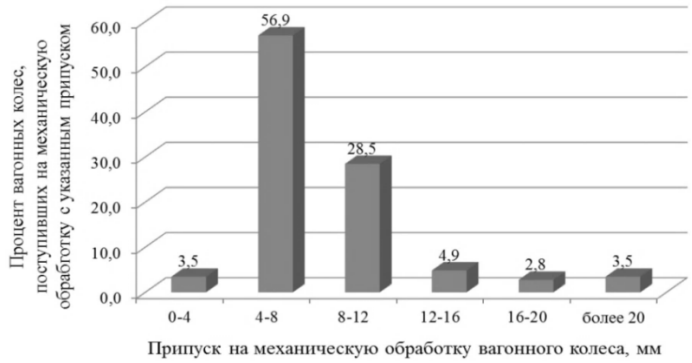


Рисунок 2 – Распределение серийных вагонных колес, поступивших на механическую обработку

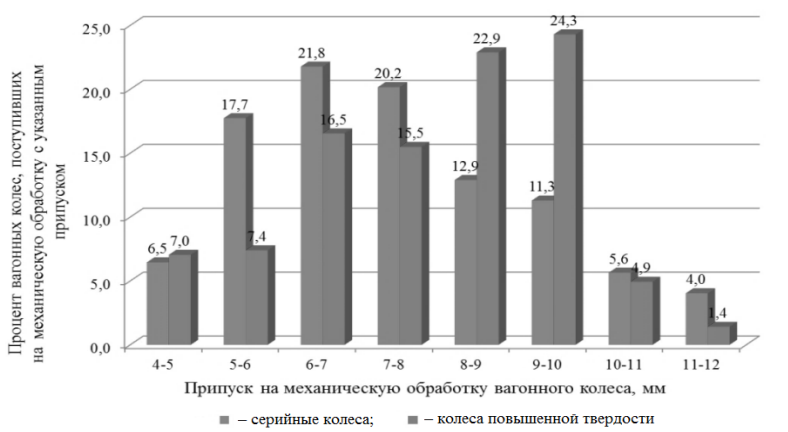


Рисунок 3 – Уточненное распределение серийных колес и колес повышенной твердости, поступивших на механическую обработку

Установление взаимосвязи между величиной припуска и глубиной дефекта выполняется путем расчета коэффициента корреляции по формуле:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right]\left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right]}}, \quad (1)$$

где x – глубина дефекта на поверхности катания колеса, мм;

y – припуск на механическую обработку, мм;

n – объем выборки, шт.

Коэффициент корреляции – это критерий, который оценивает тесноту взаимосвязи между двумя случайными величинами. Этот коэффициент может принимать значения между –1 и +1, причем если значение находится ближе к единице, то это означает наличие сильной связи, а если ближе к 0, то слабой. Отрицательный коэффициент корреляции означает наличие противоположной связи. Сила связи характеризуется также и абсолютной величиной коэффициента. Расчетные значения коэффициентов корреляции для статистических данных, приведенных на рисунках 3 и 5, следующие: для колесных пар с серийными колесами r = –0,35, а для колесных пар с твердыми колесами r = –0,39. Расчетные значения коэффициентов корреляции показывают на слабую взаимосвязь между глубиной дефекта и припуском на механическую обработку, причем отрицательную, что свидетельствует о том, что в большинстве случаев припуск задается необоснованно завышенным, что резко сокращает срок службы колеса из-за расхода полезного слоя металла колеса в стружку.

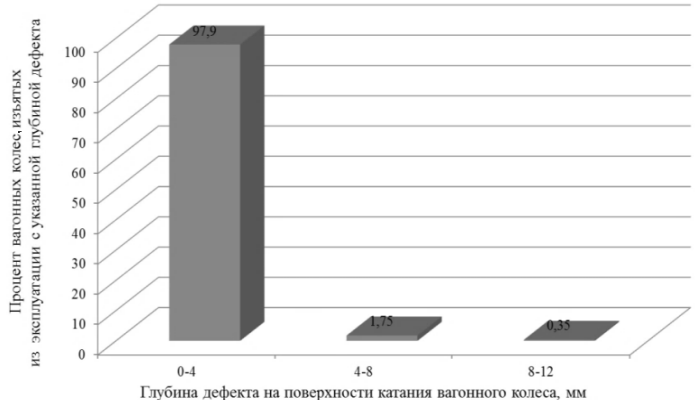


Рисунок 4 – Распределение вагонных колес, изъятых из эксплуатации по наличию на поверхности катания термомеханического повреждения

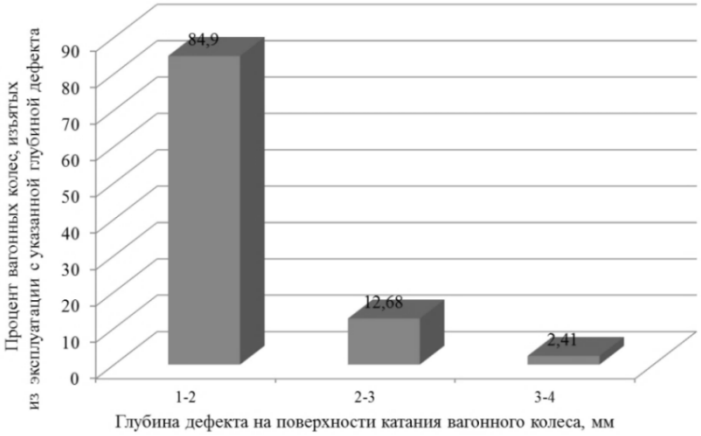


Рисунок 5 – Уточненное распределение вагонных колес, изъятых из эксплуатации по наличию на поверхности катания термомеханического повреждения

Чрезмерно завышенные припуски на механическую обработку колес объясняются тем, что станочники для исключения разрушений режущего инструмента при механической обработке поверхности катания колеса с дефектом термомеханического происхождения применяют так называемый метод резания под корку, который заключается в искусственном увеличении глубины резания.

Из технологии машиностроения [2] известны два способа назначения припуска на механическую обработку деталей: опытно-статистический (табличный) и расчетно-аналитический (метод, разработанный профессором В. М. Кованом).

Применение расчетно-аналитического способа, заключающегося в том, что значение припуска определяется методом дифференцированного расчета по элементам, составляющим припуск, позволит минимизировать необоснованный расход металла колеса в стружку. Минимальный припуск по данному способу для цилиндрических тел рассчитывается по формуле [2]:

$$2z_{i\ \min} = 2\left[(R_{z_{i-1}} + h_{i-1}) + \sqrt{\Delta_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right], \quad (2)$$

где $R_{z_{i-1}}$ – высота неровностей профиля, сформированная на предшествующем технологическом переходе, мм;

h_{i-1} – глубина дефектного поверхностного слоя, сформированного на предшествующем технологическом переходе (обезуглероженный или отбеленный слой), мм;

Δ_{i-1} – отклонение расположения поверхности (отклонения от параллельности, перпендикулярности, соосности, симметричности и т. п.), мм;

ε_i – погрешности установки заготовки на выполняемом технологическом переходе, мм.

Для того чтобы применить указанный метод назначения припуска к объекту ремонтного производства, необходимо выполнить разбивку удаляемого слоя металла колеса на отдельные элементы и ввести ряд допущений, а именно: элементами Δ_{i-1}, ε_i, $R_{z_{i-1}}$ пренебречь ввиду их малости по сравнению с глубиной дефекта.

Расчетная схема припуска на черновой технологический переход при обработке колеса с ползуном приведена на рисунке 6.

В этом случае оптимальный припуск на механическую обработку профиля катания колеса, содержащего термомеханическое повреждение,

$$Z_O = Z_1 + Z_2. \quad (3)$$

Величина Z_1 определяется по уравнению:

$$Z_1 = R_1 - \frac{1}{2}\sqrt{4R_1^2 - l_д^2}. \quad (4)$$

Величина Z_2 соответствует величине h_{i-1}, представленной в выражении (2), только в данном случае это величина дефектного слоя, образовавшегося в эксплуатации. Для ее определения необходимо исследовать процессы, происходящие в пятне контакта при скольжении колеса по рельсу.

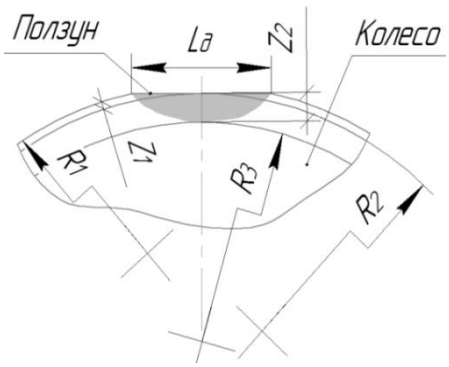


Рисунок 6 – Расчетная схема припуска: Z_1 и Z_2 – слои металла, которые необходимо снять с колеса для устранения неровности от дефекта и для устранения дефектного поверхностного слоя; R_1 – радиус колеса до механической обработки; R_2 – радиус колеса после устранения неровности от дефекта; R_3 – радиус колеса после устранения дефектного поверхностного слоя; $L_д$ – длина дефекта

Факторы, влияющие на величину Z_2, представлены в виде структурной схемы на рисунке 7.

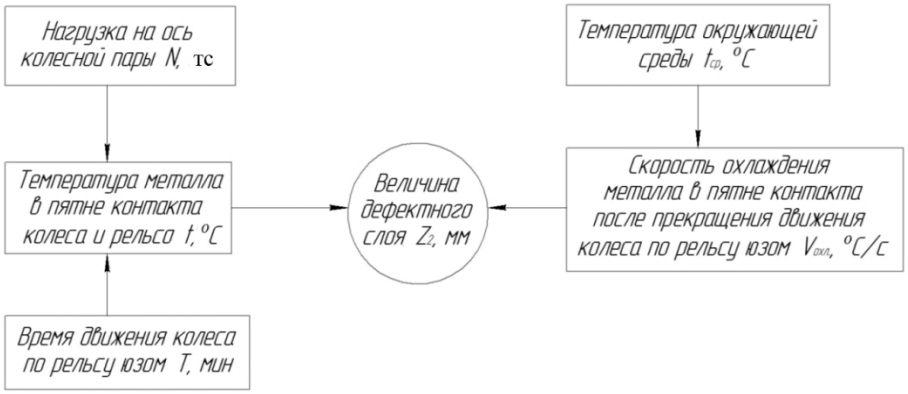


Рисунок 7 – Структурная схема факторов, оказывающих влияние на величину дефектного слоя металла колеса, содержащего ползун

Дальнейшие исследования в этой области позволят разработать математические модели для определения величины дефектного слоя колеса с учетом условий эксплуатации, алгоритм и методические рекомендации по назначению оптимального припуска на механическую обработку колеса в ремонтном производстве, что станент основой продления срока службы колеса.

Список литературы

1. Обрывалин, А. В. Восстановление профиля катания вагонных колес повышенной твердости с эксплуатационными дефектами термомеханического происхождения [Текст] / А. В. Обрывалин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 4 (12). – С. 30 – 34.

2. Маталин, А. А. Технология машиностроения [Текст] / А. А. Маталин. – СПб: Лань, 2008. – С. 253 – 255.

References

1. Obryvalin A. V. Regenerative repair of the driving profile of carload wheels of the increased hardness with thermomechanical operational defects [Vosstanovlenie profily kataniy vagonnih koles povishennoi tverdosti s ekspluatacionnimi defektami termomehanicheskogo proishogdeniy]. *Izvestia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 4 (12), pp. 30 – 34.

2. Matalin A. A. *Tehnologiy mashinostroeniy* [Technology of mechanical engineering]. St. Petersburg: Lan', 2008, pp. 253 – 255.

УДК 629.423.31; 621.822

Ш. С. Файзибаев, Г. А. Хромова, М. А. Махамадалиева

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОФРИКЦИОННОМ ГАСИТЕЛЕ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье предлагается численно-аналитический метод, основанный на методе граничных элементов (Method of Boundary Elements Technology), который служит для оценки закономерностей изменения температурных полей в рабочей жидкости в гидрофрикционном гасителе колебаний телескопического вида при изменении температуры окружающей среды. Данный метод учитывает физико-механические свойства рабочей

жидкости, температуру налива и окружающей среды, скорость движения электроподвижного состава и высоту налива рабочей жидкости.

Анализ исследований по расчету демпферов для высокоскоростного электроподвижного состава показал, что почти во всех конструкциях рессорного подвешивания современных электропоездов применяются гидрофрикционные демпферы различного типа с совмещением свойств как фрикционного, так и гидравлического трения с системами автоматизированного контроля (например, во Франции, Германии, Испании, Швейцарии, Японии, России и Узбекистане). Кроме того, в существующих методиках расчета до настоящего времени не были учтены влияние повышенной скорости движения, физико-механические свойства рабочей жидкости, тепловые контактные процессы, объемная конфигурация тепловых полей, возникающих в гидравлических гасителях колебаний.

Известно, что при прохождении жидкости через дроссельные каналы гасителя возникает вязкое трение, в результате чего механическая энергия колебательного движения железнодорожного транспортного средства превращается в тепловую, которая затем рассеивается в окружающую среду. Воздействие тепловой энергии на детали гасителя колебаний, и особенно на рабочую жидкость, вызывает изменение силовой характеристики и влияет на работоспособность гасителя колебаний в целом. Это объясняется в первую очередь объемным и линейным расширением деталей, изменением вязкости рабочей жидкости и физических свойств резиновых деталей гасителя. Особенно заметно температурное воздействие в начальный момент работы гасителя колебаний после долгой стоянки подвижного состава. Этот переходный процесс характеризуется резким изменением температурного поля всего гасителя колебаний и, как следствие, значительными внутренними температурными деформациями и изменением режима работы. Особенно сильное влияние при этом испытывают детали гасителя колебаний, выполненные из разнородных материалов, так как имеют различные коэффициенты теплопроводности, геометрические размеры и массу и, следовательно, не одинаковое во времени линейное или объемное расширение. Кроме того, температурное поле гасителя колебаний имеет несимметричную форму из-за направления встречного потока воздуха, зависящего от скорости движения электроподвижного состава, а также от скорости и направления ветра в произвольный момент времени. Форму температурного поля в значительной степени может искажать солнечная радиация, которая в свою очередь может менять направление, интенсивность и угол падения на поверхность гасителя колебаний, а может пропадать совсем.

Для того чтобы иметь возможность при конструировании новых гасителей колебаний или при модернизации и ремонте существующих наиболее правильно подбирать материалы, рабочую жидкость и геометрические размеры деталей, необходимо точно знать форму температурных полей в элементах гасителя колебаний при его работе.

До настоящего времени вопросу распределения температурного потока в гидравлических гасителях колебаний практически не уделялось никакого внимания ввиду сложности получающихся задач и наличия множества переменных внешних факторов, приводящих к сложным граничным условиям. Однако учет температурных воздействий на детали гидравлического гасителя может значительно скорректировать его силовые и эксплуатационные характеристики и позволит целенаправленно создавать системы автоматической температурной компенсации параметра сопротивления.

Кроме того, до настоящего времени выполнено мало исследований по изучению температурных полей с использованием трехмерного уравнения теплопроводности [1 – 3]. Точное аналитическое решение этого уравнения затруднительно, поэтому авторами данной статьи разработан численно-аналитический прикладной метод для инженерных расчетов, учитывающий данные экспериментальных исследований и эксплуатации. Данный метод базируется на технологии граничных элементов с применением кусочно-линейной аппроксимации.

Поставим задачу математического моделирования процесса распределения температурного потока в гидрофрикционных гасителях колебаний длиной L и диаметром D с целью определения температурных полей в зависимости от физико-механических свойств рабочей

жидкости, температуры налива ($T_{нал}$), температуры окружающей среды ($T_{ср}$), скорости движения электроподвижного состава V и высоты налива. Рабочая жидкость заливается в гидрофрикционный гаситель колебаний на высоту ($D - h$).

Используем для модели оценки закономерностей изменения температурных полей трехмерное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах r, φ и z согласно рекомендациям работ [1 – 3] в виде:

$$\nabla^2 T - F(T)\frac{\partial T}{\partial t} = F_1(T)\cdot\Phi(r,t), \tag{1}$$

где обозначено

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}, \tag{2}$$

с начальным условием в виде

$$T(r,\phi,Z,0) = T_{нал}\ ;\ 0 \le \varphi \le \varphi_{max}\ ;\ 0 \le r \le D/2 \tag{3}$$

и граничными условиями по аналогии с работой [7].

Находим собственные функции для уравнения (2) с использованием метода Фурье в предположении

$$T = U(\phi)\cdot V(Z)\cdot W(r) \tag{4}$$

в виде цилиндрических гармоник вида:

$$T_{\pm Km}(r,\phi,Z) = e^{\pm KZ}\cdot Z_m(Kr)\cdot(\alpha\cdot\cos(m\phi)+\beta\cdot\sin(m\phi)); \tag{5}$$

$$T_{\pm K0}(r,\phi,Z) = e^{\pm KZ_0}\cdot(Kr)\cdot(\alpha+\beta\cdot\phi); \tag{6}$$

$$T_{0m}(r,\phi,Z) = (a+b\cdot Z)\cdot(A\cdot r^m+\frac{B}{r^m})\cdot(\alpha\cdot\cos(m\phi)+\beta\cdot\sin(m\phi)); \tag{7}$$

$$T_{00}(r,\phi,Z) = (a+b\cdot Z)\cdot(A+B\cdot \ell n\cdot r)\cdot(\alpha+\beta\cdot\phi), \tag{8}$$

где $Z_m(\zeta)$ – цилиндрическая функция; в частности, в нашем случае при ограниченности решения T при $r = 0$ $Z_m(\zeta)$ – функция Бесселя первого рода – $I_m(\zeta)$. В результате численного решения проводится анализ системы трех нелинейных уравнений вида:

$$\frac{d^2}{d\phi^2}U(\phi)+m^2\cdot U(\phi)=0; \tag{9}$$

$$\frac{d^2}{dZ^2}V(Z)-K^2\cdot V(Z)=0; \tag{10}$$

$$\frac{d^2}{dr^2}W(r)+\frac{1}{r}\frac{d}{dr}W(r)+(k^2-\frac{m^2}{r^2})\cdot W(r)=0. \tag{11}$$

Функции $F(T)$ и $F_1(T)$ в нелинейном уравнении (1) берутся согласно экспериментальным данным и имеют вид:

$$F(T) = \frac{C_{н}(T) \cdot \rho_{н}(T)}{K_{н}(T)}, \tag{12}$$

$$F_1(T) = \frac{\alpha}{C_{н}(T) \cdot \rho_{н}(T)}, \tag{13}$$

где введены обозначения: $C_{н}(T)$, $K_{н}(T)$, $\rho_{н}(T)$ – переменные значения теплоемкости, коэффициента теплопроводности и плотности рабочей жидкости, зависящие от температуры.

Данные приняты по результатам экспериментальных исследований [4, 5, 7]. На рисунках 1 – 3 представлены графики для тепловых полей, возникающих в гидрофрикционном гасителе колебаний типа КВЗ-ЛИИЖТ. При этом свойства рабочих жидкостей варьировались на основании осредненных данных методом кусочно-линейной аппроксимации с шагом в 1 °С [4, 5, 7].

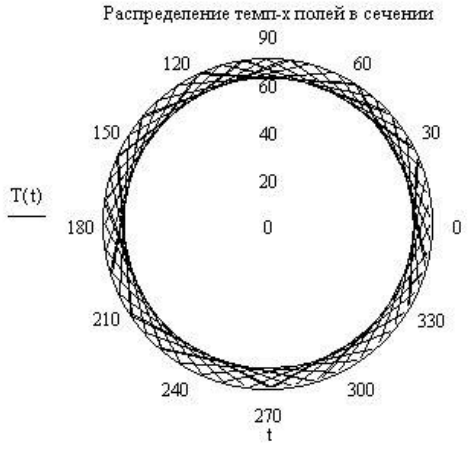


Рисунок 1 – Изотермические линии в корпусе рабочего цилиндра гидрофрикционного гасителя колебаний

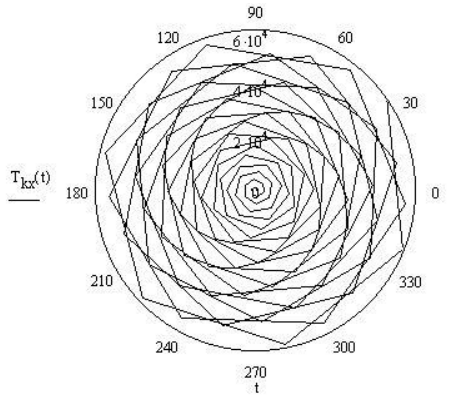


Рисунок 2 – График в полярных координатах распространения теплового потока в «однородном» гасителе вокруг вертикальной оси по высоте рабочего цилиндра

Программа для трехмерного моделирования тепловых контактных процессов, возникающих в гидравлических гасителях колебаний телескопического типа, составлена для среды программирования MathCad 14. Она строится по модульному принципу численного расчета и основана на методе кусочно-линейной аппроксимации и методе граничных элементов. Частотные уравнения для собственных функций решаются методом итераций.

Тепловой поток направлен от вертикальной оси симметрии гасителя в радиальном направлении и равномерно распределен по всему объему гасителя колебаний. Основной излучающей поверхностью является наружная поверхность рабочего цилиндра гасителя колебаний (см. рисунок 1). На этом графике построены линии равной температуры в стенке корпуса рабочего цилиндра (изотермические линии) с учетом процесса теплопередачи в материале.

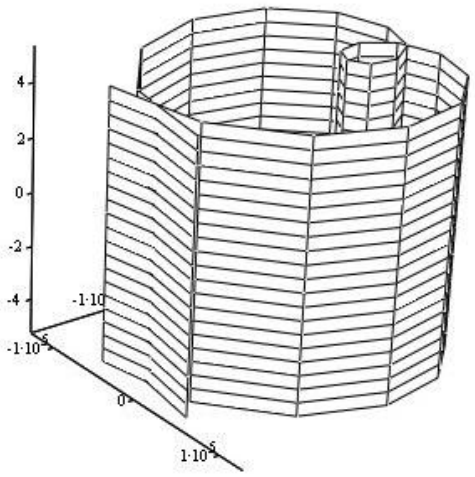


Рисунок 3 – Пространственная модель распределения температурного поля в гидравлическом гасителе колебаний при фиксированном значении времени по его высоте

На рисунке 2 показан график распространения теплового потока в гидравлическом гасителе типа КВЗ-ЛИИЖТ вокруг вертикальной оси при варьировании высоты рабочего цилиндра.

На основании проведенных расчетов установлена средняя скорость распространения тепла в гасителе колебаний, среднее значение которой оказалось равным 0,0114 м/с.

На рисунке 3 представлен график распределения по высоте температурного поля внутри гидрофрикционного гасителя колебаний при установившемся режиме работы для одного значения времени. На графике рисунка 3 отчетливо видно, что температура в верхней части рабочего цилиндра несколько выше, чем в нижней. Это хорошо подтверждает закон конвекции: теплые слои жидкости поднимаются вверх, а более холодные опускаются вниз. Малая разница температур верхней зоны и нижней объясняется тем, что при работе гасителя колебаний происходит активное перемешивание рабочей жидкости внутри цилиндра, благодаря чему значения температуры выравниваются.

В результате предлагается численно-аналитический метод, основанный на методе граничных элементов (Method of Boundary Elements Technology), который служит для оценки закономерностей изменения температурных полей в рабочей жидкости в гидрофрикционном гасителе колебаний телескопического вида при изменении температуры окружающей среды. Данный метод учитывает физико-механические свойства рабочей жидкости, температуру налива и окружающей среды, скорость движения электроподвижного состава и высоту налива рабочая жидкости.

В результате проведенных численных исследований установлено, что

температура в верхней части рабочего цилиндра незначительно превышает температуру в его нижней части; изменение температуры внутри гасителя колебаний происходит по линейному закону, равномерно во всех радиальных направлениях, при этом в верхних сечениях (над поршнем) скорость увеличения температуры выше, чем в нижних;

в процессе работы гаситель колебаний подвижного состава вместе с рабочей жидкостью сильно нагревается. При этом резко снижается параметр сопротивления гасителя колебаний. Следовательно, необходимы меры по автоматической регулировке параметра сопротивления в зависимости от температуры окружающего воздуха и самого гасителя колебаний;

температурное поле гасителя колебаний имеет несимметричную форму из-за направления встречного потока воздуха, зависящего от скорости движения электроподвижного состава, а также от скорости и направления ветра в произвольный момент времени (см. рисунок 3).

Список литературы

1. Численные методы в динамике жидкости [Текст] / Э. Джеймсон, Т. Мюллер и др. – М.: Мир, 1985. – 54 с.

2. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

3. Пасконов, В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – М.: Наука, 1984. – 288 с.

4. Соколов, М. М. Гасители колебаний подвижного состава: Справочник [Текст] / М. М. Соколов, В. И. Варава, Г. М. Левит. – М.: Транспорт, 1985. – 216 с.

5. Челноков, И. И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов [Текст] / И. И. Челноков. – М.: Транспорт, 1975. – 73 с.

6. Глущенко, А. Д. Model and numeric investigation of impuls contact fields of interface layers [Текст] / А. Д. Глущенко, Ш. С. Файзибаев, С. А. Хромов // Boundary Element Technology XIV. – Орландо, 2001. – С. 257 – 263.

7. Алгоритм для численных исследований гидравлических гасителей колебаний для высокоскоростного электрического транспорта [Текст] // Ш. С. Файзибаев, Г. А. Хромова и др. / Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. «Локомотивы XXI век» / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2013. – С. 77 – 79.

References

1. Jameson E., Muller T., Ballhaus U., Kraus V., Belocerkovskiy O. *Chislennie metodi v dinamike jidkosti* (Numerical methods in fluid dynamics). Moscow: Mir Publ., 1985, 54 p.

2. Patrick J. Roache *Vychislitelnaya gidrodinamika* (Computational Fluid Dynamics). Moscow: Mir Publ., 1980, 616 p.

3.Paskonov V. M., Polejaev V. I., Chudov L. A., *Chislennoe modelirovaniya processov teplo i massoobmena* (Numerical modeling of heat and mass transfer). Moscow: Nauka Publ., 1984, 288 p.

4. Sokolov M. M., Varava V. I., Levit G. M., *Gasiteli kolebaniy podvijnogo sostava* (Vibration dampers of rolling stock). Moscow: Transport Publ., 1985, 216 p.

5. Chelnokov I. I., *Gidravlicheskie gasiteli kolebaniy passajirskih vagonov* (Hydraulic dampers of passenger cars). Moscow: Transport Publ., 1975, 73 p.

6. Glushenko A. D., Faizibaev Sh. S., Khromov S. A. Model and numeric investigation of impuls contact fields of interface layers (Boundary Element Technology XIV). – Orlando, 2001, pp. 257 – 263.

7. Faizibaev Sh. S., Khromova G. A., Khromov S. A., Mahbubov A. R. The algorithm for numerical studies hydraulic shock absorbers (dampers) for high-speed electric vehicles [Algoritm dlya chislennix issledovanij gidravlicheskix gasiteley kolebanij dlya visokoskorostnogo elektricheskogo trasporta]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Lokomotivy XXI vek»* (In proceedings of the International scientific-practical conference «Locomotives XXI century»). – St. Petersburg, 2013, pp. 77 – 79.

УДК 621.315:621.317

А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, Е. А. Кротенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГИРЛЯНДАХ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В статье рассмотрены основные виды повреждений изоляторов контактной сети, приведена статистика по их отказам. Выявленные недостатки в существующих методах диагностирования говорят об актуальности проблемы, особенно на участках железных дорог постоянного тока. Произведены экспериментальные исследования по измерению напряженности электростатического поля на гирляндах изоляторов. Анализ проведенных исследований показал, что наличие в гирлянде неисправных изоляторов приводит к увеличению напряженности электростатического поля вокруг них.

Предложены техническое устройство бесконтактного измерения электростатического поля и методика определения неисправного изолятора в гирлянде.

Определяющими причинами отказов контактной сети, влияющими на безопасность движения в хозяйстве электрификации и электроснабжения, являются перекрытие и разрушения изоляторов контактной сети (21 %), обрывы и пережоги проводов (19 %), разрушение зажимов (11 %), нарушение регулировки контактной сети (10 %), обрывы струн (7 %) [1].

На участках контактной сети постоянного тока преимущественно используются подвесные фарфоровые изоляторы тарельчатого типа. Повреждения фарфоровых подвесных изоляторов приводят к сбою движения поездов, а в некоторых случаях и к большим перерывам, необходимым для восстановления поврежденных конструкций. Среди общего числа неисправностей подвесных изоляторов контактной сети преобладающими являются механические повреждения. Подобные разрушения изоляторов часто происходят при неблагоприятных метеорологических условиях (в период сильных ветров и автоколебаний проводов, при низкой температуре окружающей среды).

Основные причины разрушения подвесных изоляторов: ограниченная механическая прочность при ударных нагрузках; быстрое старение в эксплуатации; недостатки конструкций фиксирующих узлов; нарушение норм содержания; случаи, не связанные с эксплуатацией [6].

Недостаточная механическая прочность подвесных изоляторов при их защемлении и воздействии ударных нагрузок приводит к разрушению фарфора. Снижение механической прочности некоторых изоляторов при длительной эксплуатации обычно происходит из-за возникновения значительных напряжений в месте сопряжения фарфора, цементной заделки и металлической арматуры в связи с разными коэффициентами температурного расширения этих материалов. В таких местах в фарфоре возникают микро- и макротрещины, со временем развивающиеся и снижающие механическую прочность всего изолятора. Максимальная потеря прочности происходит при низкой температуре окружающей среды [2].

Прочность изолятора уменьшается также из-за постоянных ударных нагрузок, передающихся на изолятор при эксплуатации. В таких случаях в фарфоре также возникают скрытые трещины, которые затем развиваются. Скрытость дефектов, которые нельзя обнаружить ни визуально, ни электрическими испытаниями, наиболее опасна в эксплуатации.

Одна из возможных конструкций подвесного тарельчатого изолятора [3] представлена на рисунке 1.

На рисунке в масштабе указаны точки, характеризующие распределение электростатического поля вокруг изолятора, находящегося под действием постоянного напряжения. Точки *a, b* и *c* находятся на расстоянии 5, 10 и 15 см от шапки изолятора соответственно. Точки *d, e* и *f* находятся на расстоянии 2, 5 и 10 см от изолирующего тела изолятора соответственно. Точка g находится в 15 см от пестика изолятора.

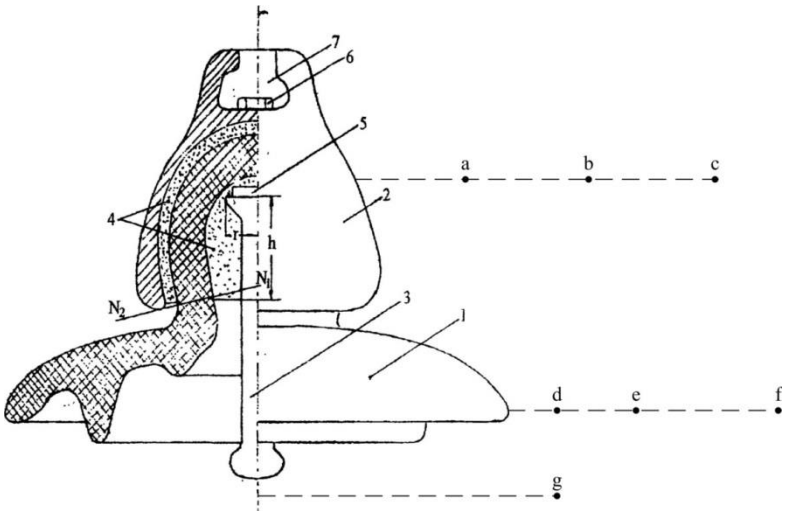


Рисунок 1 – Схема подвесного изолятора: 1 – изолирующее тело изолятора; 2 – шапка изолятора; 3 – пестик; 4 – песочно-цементная связка; 5 – прокладка; 6 – пружинный замок; 7 – паз; N_1, N_2 – направление силы нормального давления; *a* – *g* – характерные точки измерения напряженности электростатического поля



а б в

Рисунок 2 – Внешний вид подвесных фарфоровых изоляторов

Внешний вид подвесных фарфоровых изоляторов тарельчатого типа приведен на рисунке 2.

Основным видом контроля изоляции контактной сети в процессе эксплуатации является осмотр при обходах и объездах вагоном-лабораторией [4]. На участках железных дорог переменного тока получили распространение дистанционные методы диагностирования изоляторов контактной сети. Однако все они имеют существенные недостатки.

Методы просвечивания подразумевают вывод диагностируемой гирлянды из обращения. Такой метод требует значительных временных затрат и введения дополнительных «окон» на действующих участках контактной сети. Ультразвуковая дефектоскопия является сложным методом диагностирования. Только работник с большим опытом сможет выявить неисправность в гирлянде таким способом. Тепловизионная дефектоскопия позволяет диагностировать гирлянды только в темное время суток. Ни один из этих методов не получил распространения на участках постоянного тока.

Фарфоровые тарельчатые изоляторы на участках постоянного тока диагностируют при помощи измерительной штанги типа ШИ-10 с изолирующей рабочей площадки съемной вышки или автомотрисы [5]. Для диагностирования гирлянды с тремя изоляторами штанга оборудуется приставкой с двумя щупами.

Измерение осуществляется касанием щупами штанги одновременно по обе стороны изолятора гирлянды поочередно: первым – со стороны контактной сети (напряжения), вторым – со стороны заземляющих конструкций, а затем – средних изоляторов. Изоляторы, имеющие сопротивление 300 МОм и менее и ток утечки 10 мкА и более, считаются дефектными. В этих случаях стрелка измерительного прибора будет уходить вправо за красную предельную отметку и будет загораться неоновая лампа-индикатор.

Схема диагностирования изоляторов при помощи измерительной штанги приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема диагностирования изоляторов в гирлянде: 1, 2, 3, 4 – последовательность проверки изоляторов в гирлянде

Такой метод диагностирования является контактным и подразумевает непосредственное соприкосновение измерительной штанги и гирлянды изоляторов, находящейся под напряжением 3 кВ. Даже при соблюдении всех принятых мер безопасности такая методика требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

В связи с этим была разработана методика бесконтактного диагностирования гирлянд контактной сети постоянного тока с использованием прибора СТ-01. Измеритель СТ-01 предназначен для измерения напряженности электростатического поля на различных расстояниях от его источника.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Техника высоких напряжений и электротехнических материалов» (ТВН) кафедры «Электроснабжение желез-

нодорожного транспорта» ОмГУПСа. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 4.

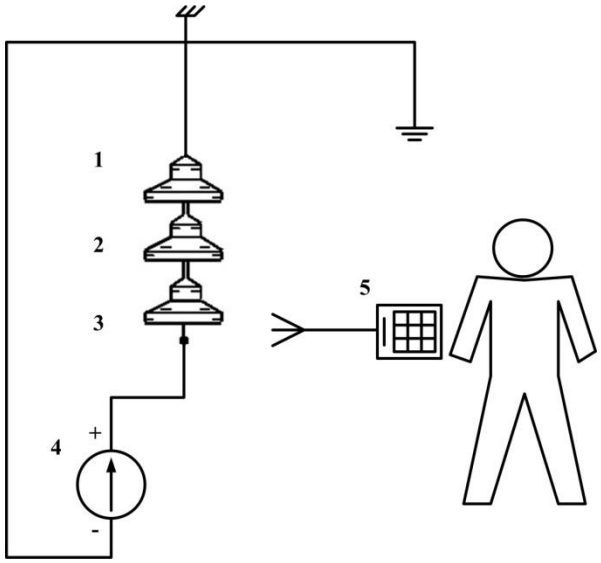


Рисунок 4 – Схема проведения эксперимента: 1, 2, 3 – изоляторы в гирлянде;
4 – источник постоянного напряжения 3 кВ; 5 – измеритель СТ-01

На гирлянду изоляторов подавалось постоянное напряжение 3 кВ от источника типа АИД-70. В первом опыте измерялась напряженность электростатического поля на исправной гирлянде. Сопротивление каждого изолятора – 300 МОм, емкость порядка 50 – 70 пФ. Полученные данные приведены в таблице 1. Детальное исследование распределения поля вокруг изолятора показало, что наиболее информативными являются значения, измеренные в непосредственной близости от изолирующего тела изолятора (характерные точки *d*, *e* и *f* на рисунке 1).

Таблица 1 – Результаты измерения электростатического поля на исправной гирлянде изоляторов

Номер изолятора в гирлянде	Расстояние от изолирующего тела изолятора, см	E_m, кВ/м
1	2	4,19
	5	2,44
	10	1,67
2	2	7,25
	5	4,29
	10	2,35
3	2	11,1
	5	6,0
	10	3,45

Далее один из изоляторов в гирлянде менялся на неисправный, его сопротивление – 500 кОм и емкость – 5 – 10 пФ. Сначала был рассмотрен наиболее часто встречающийся случай, когда неисправен ближайший к токоведущим проводам изолятор (№ 3 на рисунке 4). Данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения электростатического поля с третьим неисправным изолятором

Номер изолятора в гирлянде	Расстояние от изолирующего тела изолятора, см	E_m, кВ/м
1	2	3,91
	5	2,82
	10	1,94
2	2	8,25
	5	4,92
	10	3,35
3 (неисправен)	2	19,1
	5	7,74
	10	4,26

Далее неисправный изолятор устанавливался в положение 2 и 1 (см. рисунок 4). Данные этих экспериментов приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3 – Результаты измерения электростатического поля со вторым неисправным изолятором

Номер изолятора в гирлянде	Расстояние от изолирующего тела изолятора, см	E_m, кВ/м
1	2	7,23
	5	3,77
	10	2,04
2 (неисправен)	2	15,8
	5	6,46
	10	3,27
3	2	7,46
	5	3,49
	10	2,61

Таблица 4 – Результаты измерения электростатического поля с первым неисправным изолятором

Номер изолятора в гирлянде	Расстояние от изолирующего тела изолятора, см	E_m, кВ/м
1	2	3
1 (неисправен)	2	7,42
	5	2,65
	10	1,49
2	2	4,17
	5	2,99
	10	1,77
3	2	9,6
	5	5,16
	10	2,45

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что наличие неисправного изолятора в гирлянде приводит к увеличению напряженности электростатического поля вокруг гирлянды. Величина напряженности электростатического поля зависит от расстояния, на котором производятся измерения. Для стабилизации результатов измерений распределения поля вокруг гирлянд изоляторов предложено новое устройство бесконтактного диагностирования.

Структурная схема предложенного устройства приведена на рисунке 5. Устройство разработано на основе прибора СТ-01. В состав устройства дополнительно введены три блока преобразования (БП1 – БП3), блок коммутации (БК), измерительная штанга (ИШ), которые последовательно подключаются к блоку управления и индикации (БУИ) и логическому блоку (БЛ).

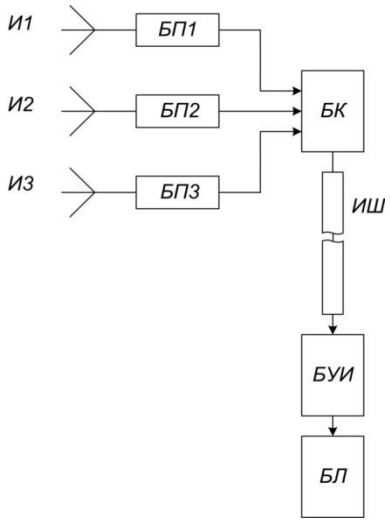


Рисунок 5 – Структурная схема устройства диагностирования гирлянды изоляторов

Логический блок выдает результат контроля гирлянды изоляторов И1, И2, И3 путем сравнения измеренных сигналов, пропорциональных напряженности поля, с пороговыми значениями дефектных изоляторов.

Совместно с методом дистанционного диагностирования, описанного в работе [8], данные разработки позволят качественно улучшить процесс выявления дефектных изоляторов, сократив трудовые и временные затраты обслуживающего персонала.

Список литературы

1. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2013 г. [Текст] / Управление электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД». – М.:, 2014. – 100 с.

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

3. Каталог изоляторов для контактной сети и ВЛ электрифицированных железных дорог [Текст]. – М.: Трансиздат, 2000.

4. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий: Справочник [Текст]. – М.: Транспорт, 2001. – 512 с.

5. Технологические карты для работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Техническое обслуживание и текущий ремонт [Текст] / МПС РФ, Департамент электрификации и электроснабжения. – М., 1999. – 427 с.

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

7. Разевиг, Д. В. Техника высоких напряжений [Текст] / Д. В. Резевиг. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

8. Кузнецов, А. А. Моделирование процесса дистанционного диагностирования изоляторов контактной сети [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2014. – № 4 (20). – С. 92 – 97.

References

1. *Analiz raboty khoziaistva elektrifikatsii i elektrosnabzheniia v 2013 g.* (Analysis of the farm electrification and power supply in 2013). Moscow, 2014, 100 p.

2. Mikheev V. P. *Kontaktnye seti i linii elektroperedachi* (The contact network and power lines). Moscow: Marshrut, 2003, 416 p.

3. *Katalog izoliatorov dlia kontaktnoi seti i VL elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Product insulators for overhead lines and contact network of electrified railways). Moscow: Transizdat, 2000.

4. *Normativno – metodicheskaia dokumentatsiia po ekspluatatsii kontaktnoi seti i vysokovol'tnykh vozdushnykh linii. Spravochnik* (Normative – methodical documentation manual contact network and high-voltage air-lines. Directory). Moscow: Transport, 2001, 512 p.

5. *MPS RF, Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniia. Tekhnologicheskie karty dlia raboty po soderzhaniiu i remontu ustroistv kontaktnoi seti elektrifitsirovannykh zhe-leznykh dorog. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i tekushchii remont* (Railway Ministry, the Department of electrification and power supply. Routings to work on maintenance and repair of the contact network of electric-useful to the roads. Maintenance and repair services). Moscow, 1999, 427 p.

6. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Power supply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.

7. Razevig D. V. *Tekhnika vysokikh napriazhenii* (Technics of high pressure). Moscow: Energiia, 1976, 488 p.

8. Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu. Modeling of remote diagnostics of insulators catenary [Modelirovanie protsessa distantsionnogo diagnostirovaniia izoliatorov kontaktnoi seti]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 4 (20), pp. 92 – 97.

УДК 621.311.001.57

В. Л. Незевак, А. П. Шатохин, О. В. Гателюк

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО КРИТЕРИЮ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В статье рассматривается подход к оценке влияния на расход электроэнергии на тягу поездов параметров графика движения в условиях применения рекуперативного торможения. Поиск варианта с минимальным

потреблением энергии основан на моделировании графика движения при различных межпоездных интервалах в условиях организации пакетного обращения поездов на участке железной дороги. По результатам моделирования предлагается представить полученную зависимость изменения расхода электроэнергии от параметров графика движения поездов в виде аналитической функции нескольких переменных n-го порядка для последующего применения при построении нормативных графиков движения с целью сокращения расхода электроэнергии на тягу поездов.

В настоящее время задача повышения энергетической эффективности перевозок на железнодорожном транспорте является одной из важнейших задач, имеющих общегосударственное значение. Государственная политика в данной сфере стимулирует мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности, вводя, например, льготное налогообложение для объектов высокой энергетической эффективности [1]. В соответствии с ориентирами, задаваемыми государством в области повышения энергетической эффективности, Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» одной из приоритетных задач устанавливает существенное повышение уровня рекуперируемой энергии и эффективности ее использования [2].

Одним из перспективных направлений в решении указанной задачи является введение в расписание энергооптимальных графиков и твердых ниток графика для грузовых поездов. Опыт реализации энергооптимальных графиков в пассажирском движении показал возможность сокращения расхода электроэнергии на тягу на 5 – 6 %. Например, в пассажирском движении при введении энергооптимальных графиков на участках Москва – Санкт-Петербург и Санкт-Петербург – Бабаево усредненный расход электроэнергии на тягу сократился на 5,9 и 7,5 % соответственно. В настоящее время энергооптимальные графики вводятся в график движения поездов и в грузовом движении. Эффект от внедрения энергооптимального графика определяется применительно к движению одного поезда с учетом профиля пути, ограничения скорости, особенности локомотива, массы поезда, режима вождения [3]. При этом не рассматриваются вопросы, связанные с максимальным использованием энергии рекуперативного торможения поездами, следующими в тяге, однако, как показывают результаты исследований, при этом может достигаться значительное сокращение расхода электроэнергии на тягу [4]. Взаимное расположение поездов на межподстанционной зоне определяет условия для приема энергии рекуперации. В случае отсутствия поездов на перегоне, следующих в тяге, отсутствуют и условия для применения рекуперативного торможения. В свою очередь расположение поездов на межподстанционных зонах определяется нормативным графиком движения поездов, определяющим время прибытия и отправления поездов со станций. К параметрам нормативного графика движения, определяющим взаимное расположение поездов на межподстанционных зонах, следует отнести межпоездной интервал, количество поездов в пакете и количество пакетов в графике.

Количество факторов, оказывающих влияние на величину расхода электроэнергии на тягу поездов на участке железной дороги, значительно. В связи с этим при решении задачи поиска оптимального графика движения по критерию минимума расхода электроэнергии в условиях применения рекуперативного торможения в данной работе принят ряд допущений. Как известно, на расход электроэнергии оказывает существенное влияние целый ряд факторов [5 – 7], среди которых следует отметить такие, как температура окружающей среды, масса поезда, нагрузка на ось вагона, техническая скорость поезда, серия электроподвижного состава, размеры движения, условия для применения рекуперативного торможения и др. С целью оценки влияния параметров графика движения на расход электроэнергии в условиях применения рекуперативного торможения рассмотрим различные варианты построения графика движения поездов. Различия вариантов между собой будут заключаться в различных величинах межпоездного интервала, количестве пакетов и поездов в пакете графика. Все остальные факторы при построении графика движения сохраняются неизменными для всех рассматриваемых вариантов.

В общем виде зависимость расхода электроэнергии для рассматриваемой задачи принимает вид функции трех переменных:

$$W = f(n, \tau_1, \tau_2), \quad (1)$$

где n – количество поездов в пакете, шт.;

τ_1 – интервал между поездами в пакете, мин;

τ_2 – интервал между пакетами, мин.

Для пакетного графика движения поездов ограничения на количество поездов в пакете n связаны с количеством ниток графика в четном и нечетном направлениях. В общем виде количество поездов в пакете должно удовлетворять двойному неравенству:

$$n_{\min \text{ ч(н)}} \le n_{\text{ч(н)}} \le n_{\max \text{ ч(н)}}, \quad (2)$$

где $n_{\min \text{ ч(н)}}$ и $n_{\max \text{ ч(н)}}$ – минимальные и максимальные границы, которые должны удовлетворять следующим неравенствам при допущении здесь и далее того, что количество поездов в пакетах в пределах одного графика остается неизменным:

$$n_{\min \text{ ч(н)}} \ge 2, \quad (3)$$

$$n_{\max \text{ ч(н)}} \le \frac{N_{\text{ч(н)}}}{2}, \quad (4)$$

где N – количество поездов в четном или нечетном направлении.

Межпоездной интервал в пакете графика τ_1 должен удовлетворять условиям пропуска поездов по сигналам устройств сигнализации, централизации и блокировки с одной стороны, а с другой стороны – максимальному межпоездному интервалу:

$$\tau_{1\min \text{ ч(н)}} \le \tau_{1\,\text{ч(н)}} < \tau_{1\max \text{ ч(н)}}, \quad (5)$$

где $\tau_{1\min \text{ ч(н)}}$ и $\tau_{1\max \text{ ч(н)}}$ – интервалы, определяемые соответственно по условиям безопасности движения и пропуска поездов.

Минимальный межпоездной интервал определяется протяженностью блок-участков в четном и нечетном направлениях, а также ограничениями со стороны устройств инфраструктуры. Максимальный межпоездной интервал в пакете поездов графика не может превышать межпоездной интервал при равномерном графике:

$$\tau_{1\max \text{ ч(н)}} < \frac{1440}{N_{\text{ч(н)}}}. \quad (6)$$

Минимальное значение интервала между пакетами графика движения τ_2 для различных вариантов зависит от количества пакетов в графике движения и межпоездного интервала, при этом максимальное значение интервала определяется минимальным количеством пакетов графика:

$$\tau_{2\min \text{ ч(н)}} < \tau_{2\,\text{ч(н)}} < \tau_{2\max \text{ ч(н)}} \quad (7)$$

где $[\tau_{2\,\min}; \tau_{2\,\max}]$ – диапазон изменения интервалов между пакетами поездов.

Изменение рассматриваемых интервалов движения и количества поездов в пакетах не должно приводить к изменению тоннокилометровой работы на участке железной дороги за сутки и должно удовлетворять в общем случае равенству:

$$\sum_{i=1}^{k_{\text{ч(н)}}} \left((n_{k\,\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{1k} \right) + \sum_{j=1}^{k_{\text{ч(н)}}-1} \tau_{2\,\text{ч(н)}\,j} = 1440, \quad (8)$$

где $k_{\text{ч(н)}}$ – количество пакетов в сутки в четном (нечетном) направлении.

С учетом неравенства (8), связывающего количество поездов в пакете с межпоездными интервалами τ_1 и τ_2, функция (1) в условиях постоянного объема перевозок для различных вариантов принимает вид функции двух переменных.

Для частного рассматриваемого случая равенства интервалов и количества поездов в пакетах выражение (8) принимает вид:

$$(n_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{1\,\text{ч(н)}} \cdot k_{\text{ч(н)}} + (k_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{2\,\text{ч(н)}} = 1440. \quad (9)$$

Помимо представленных условий при расчетах следует обеспечить другие равные для вариантов организации графика движения условия, рассмотренные выше, а также ограничения со стороны системы тягового электроснабжения. К последним следует отнести уровень минимального напряжения на токоприемнике электроподвижного состава $U_{\min}$, максимальную температуру проводов и тросов контактной подвески T и коэффициент допустимой перегрузки силового оборудования тяговых подстанций $k_{\text{пер}}$:

$$\begin{cases} U_{\min} \geq U_{\min\,\text{доп}}; \\ T \leq T_{\max\,\text{доп}}; \\ k_{\text{пер}} \leq k_{\text{пер доп}}. \end{cases} \quad (10)$$

По условиям задачи необходимо найти вариант реализации графика движения с минимальным суточным расходом электроэнергии $W = f(n, \tau_1, \tau_2)$. Поэтому целевой функцией для рассматриваемой задачи будет являться функция суммарного расхода электроэнергии всеми поездами в четном и нечетном направлениях на участке железной дороги, определяемого с учетом потерь энергии по присоединениям контактной сети тяговых подстанций:

$$W = \sum_{i=1}^{M} W_i \to \min, \quad (11)$$

где W_i – расход электроэнергии по i-му присоединению контактной сети тяговой подстанции;

M – количество присоединений контактной сети тяговых подстанций на рассматриваемом участке железной дороги.

С учетом принятых допущений математическая модель оптимизационной задачи примет следующий вид:

$$\begin{cases} W = \sum_{i=1}^{M} W_i \to \min; \\ n_{\min\,\text{ч(н)}} \leq n_{\text{ч(н)}} \leq n_{\max\,\text{ч(н)}}; \\ \tau_{1\min\,\text{ч(н)}} \leq \tau_{1\,\text{ч(н)}} < \tau_{1\max\,\text{ч(н)}}; \\ \tau_{2\min\,\text{ч(н)}} < \tau_{2\,\text{ч(н)}} \leq \tau_{2\max\,\text{ч(н)}}; \\ (n_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{1\,\text{ч(н)}} \cdot k_{\text{ч(н)}} + (k_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{2\,\text{ч(н)}} = 1440; \\ U_{\min} \geq U_{\min\,\text{доп}}; \\ T \leq T_{\text{мах доп}}; \\ k_{\text{пер}} \leq k_{\text{пер доп}}. \end{cases} \quad (12)$$

Получение решения математической модели (12) в аналитическом виде представляется крайне трудоемким, что объясняется необходимостью учета значительного массива исходной информации, характеризующей инфраструктуру участка железной дороги, подвижной состав, обращающийся на участке, и другие условия. В связи с этим решению задачи пред-

шествует этап, на котором для участка железной дороги выполняются тяговые расчеты для всех видов электроподвижного состава. После проведения тяговых расчетов задача может быть решена на основе представленной модели (12).

Рассмотрим решение задачи на основе одного из действующих двухпутных участков железной дороги постоянного тока А – Б, который характеризуется следующими параметрами. Режим питания контактной сети – двухсторонний, параллельный. Контактная подвеска – М-95+2МФ-100 с усиливающим проводом 2А-185, рельсовая цепь – рельсы Р65 с междупутными соединителями. Система тягового электроснабжения состоит из девяти тяговых подстанций, восьми постов секционирования, четырнадцати пунктов параллельного соединения. На участке эксплуатируются электровозы серий ВЛ10, 2ЭС6, 2ЭС10. Продольный профиль пути характеризуется наличием уклонов величиной до 13,7 ‰. Унифицированная масса грузовых поездов равна 5200 т. Пассажирские и пригородные поезда на участке не обращаются. На рассматриваемом участке размеры движения составляют 80 пар поездов в сутки. Протяженность участка – 155 км. Объем суточной тоннокилометровой работы на участке составляет 832 тыс. ткм брутто. В качестве исходных условий принято, что технических остановок поездов на станциях участка не предусмотрено, неграфиковые остановки по причине отказа в работе устройств инфраструктуры и подвижного состава отсутствуют.

При решении задачи проанализируем характер изменения значения суточного расхода электроэнергии как функции двух переменных. Набор вариантов построения графика движения ограничим вариантами с постоянным межпоездным интервалом и различными вариантами пакетного пропуска поездов.

Для рассматриваемого случая количество поездов в пакете n должно удовлетворять неравенству (2):

$$2 \le n \le 40 .$$

Интервал между поездами в пакете $\tau_{1\,\text{ч(н)}}$ должен удовлетворять неравенству (5):

$$6 \le \tau_{1\,\text{ч(н)}} < 18 .$$

Интервал между пакетами $\tau_{2\,\text{ч(н)}}$ должен удовлетворять неравенству (7):

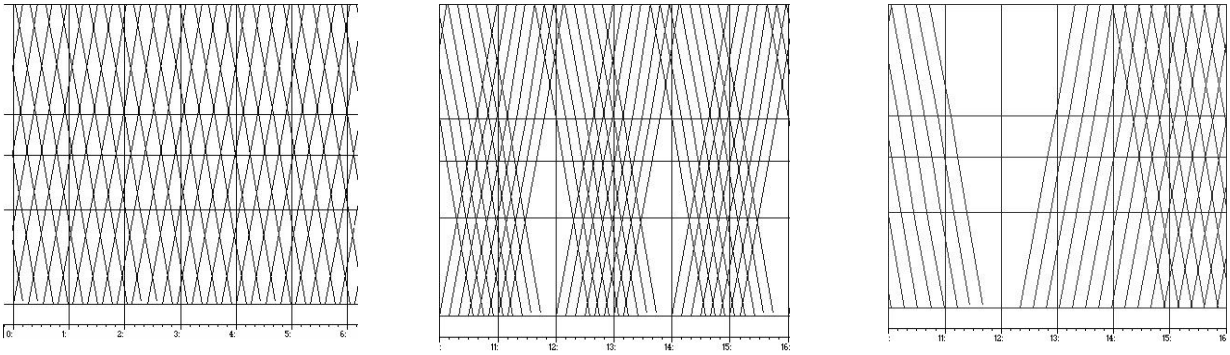
$$18 < \tau_{2\text{ч(н)}} \le 486 .$$

Математическая модель для рассматриваемой задачи принимает вид:

$$\begin{cases} W = \sum_{i=1}^{32} W_i \to \min; \\ 2 \le n_{\text{ч(н)}} \le 40; \\ 6 \le \tau_{1\,\text{ч(н)}} < 18; \\ 18 < \tau_{2\,\text{ч(н)}} \le 486; \\ (n_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{1\,\text{ч(н)}} \cdot k_{\text{ч(н)}} + (k_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{2\,\text{ч(н)}} = 1440; \\ U_{\min} \ge 2\,700; \\ T \le 100; \\ k_{\text{пер}} \le 1,5. \end{cases}$$

Решение математической модели проводится на основе множества вариантов исполнения графиков движения. На рисунке 1 представлены фрагменты различных вариантов, поясняющие порядок их рассмотрения.

По результатам расчетов формируется массив данных значений целевой функции – суммарного расхода электроэнергии на участке. Фрагмент результатов расчетов для двух вариантов организации графика движения представлен в таблице.



а б в

Рисунок 1 – Фрагменты различных вариантов реализации графика: а – равномерный график с параметрами $\tau_1 = \tau_2 = 18$; б – 10 пакетов с параметрами $\tau_1 = 10$, $\tau_2 = 50$; в – 2 пакета с параметрами $\tau_1 = 14$, $\tau_2 = 194$

Результаты расчета суточного расхода электроэнергии для различных вариантов организации суточного пакетного графика движения

Номер расчета	Вариант	Межпоездной интервал, мин	Интервал между пакетами, мин	Расход электроэнергии, кВт·ч
1	5 пакетов в четном и нечетном направлениях	10	110	1 187 878
2		10	111	1 187 786
3		10	112	1 187 901
4		10	113	1 188 680
5		10	114	1 189 336
6		10	115	1 188 748
7		12	60	1 178 330
8		12	61	1 180 176
9		12	62	1 178 418
10		12	63	1 177 964
11		12	64	1 179 950
12		12	65	1 182 490
13		14	45	1 172 439
14		14	46	1 171 476
15		14	47	1 171 986
16		14	48	1 173 125
17		14	49	1 172 570
18		14	50	1 172 910
19	10 пакетов в четном и нечетном направлениях	8	72	1 165 199
20		8	73	1 165 419
21		8	74	1 165 911
22		8	75	1 166 253
23		8	76	1 166 155
24		10	50	1 173 129
25		10	51	1 171 623
26		10	52	1 172 250
27		10	53	1 174 315
28		10	54	1 175 736
29		10	55	1 172 079
30		12	40	1 178 445
31		12	41	1 189 460
32		12	42	1 188 826
33		12	43	1 177 637
34		12	44	1 174 796

Как показывают результаты расчетов, для различных вариантов построения графика движения размах значений расхода электроэнергии на тягу для рассматриваемого участка путем изменения межпоездных интервалов в условиях пакетной организации пропуска поездов достигает 2,5 % от общего расхода электроэнергии на тягу. Данное обстоятельство свидетельствует о значительном потенциале повышения энергетической эффективности перевозок на участке. С целью оценки энергетической эффективности существующего нормативного графика следует сравнить его с вариантом, имеющим минимальный расход электроэнергии на тягу из возможных с помощью предложенного подхода. Полученная оценка потенциала повышения энергетической эффективности перевозок свидетельствует об актуальности вопроса и необходимости дальнейшей проработки и использования результатов исследований в перевозочном процессе.

Результаты расчетов значений целевой функции представлены на рисунках 2 – 4 в соответствии с принятыми ограничениями на области допустимых значений переменных. Цвет закраски клеток определяет величину расхода электроэнергии: чем темнее клетка – тем меньше расход.

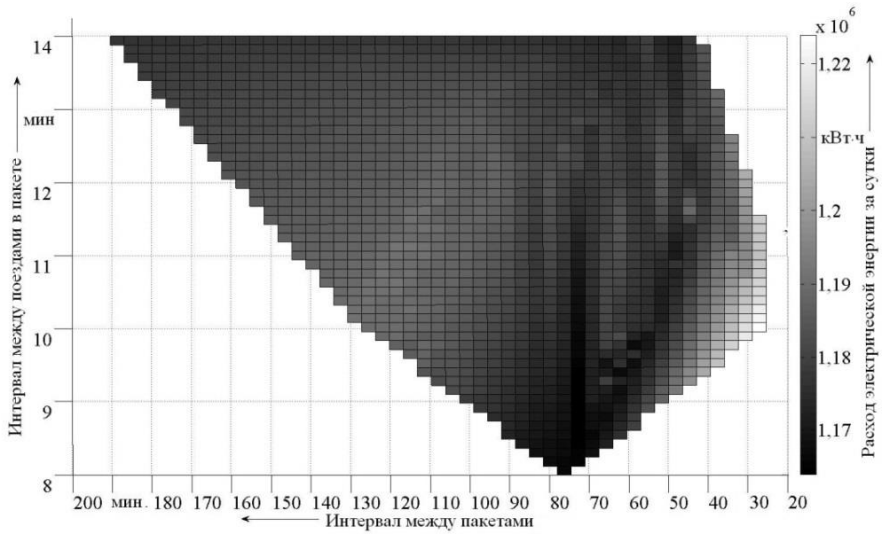


Рисунок 2 – Расход электроэнергии в зависимости от интервала между поездами в пакете и интервала между пакетами

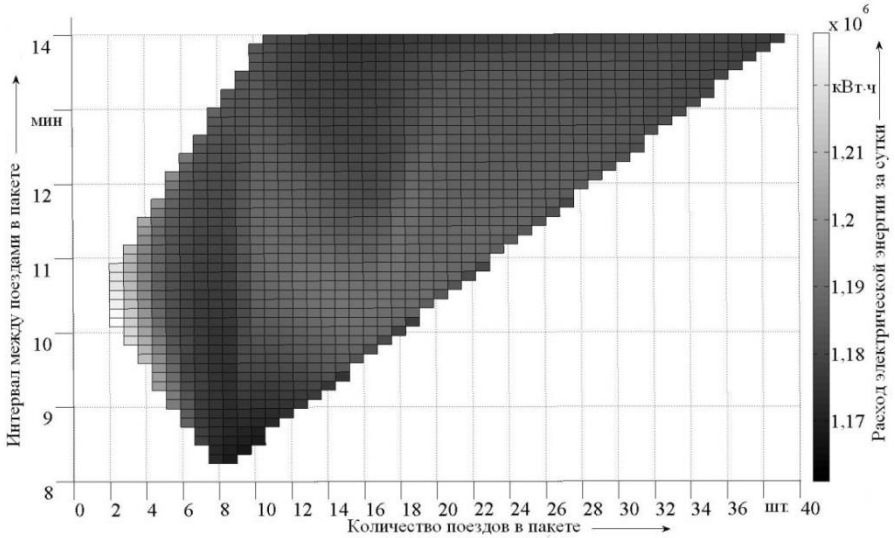


Рисунок 3 – Расход электроэнергии в зависимости от количества поездов в пакете и интервала между поездами в пакете

При рассмотрении проекций значений целевой функции в координатах τ_1 и τ_2 минимальный уровень расхода электроэнергии достигается в следующих диапазонах: $8 \le \tau_1 \le 10$ и $75 \le \tau_2 \le 80$. В случае рассмотрения проекций значений целевой функции в координатах τ_1 и n минимальный уровень расхода электроэнергии достигается в следующих диапазонах: $8 \le \tau_1 \le 10$, $8 \le n \le 10$. При рассмотрении проекций значений целевой функции в координатах τ_2 и n минимальный уровень расхода электроэнергии достигается в следующих диапазонах: $75 \le \tau_2 \le 80$, $8 \le n \le 10$. Значения коэффициентов корреляции между расходом электроэнергии и интервалом между пакетами составляют от 0,52 до 0,93 и являются статистически значимыми (t-критерий Стьюдента) [9, 10], что свидетельствует об их взаимосвязи.

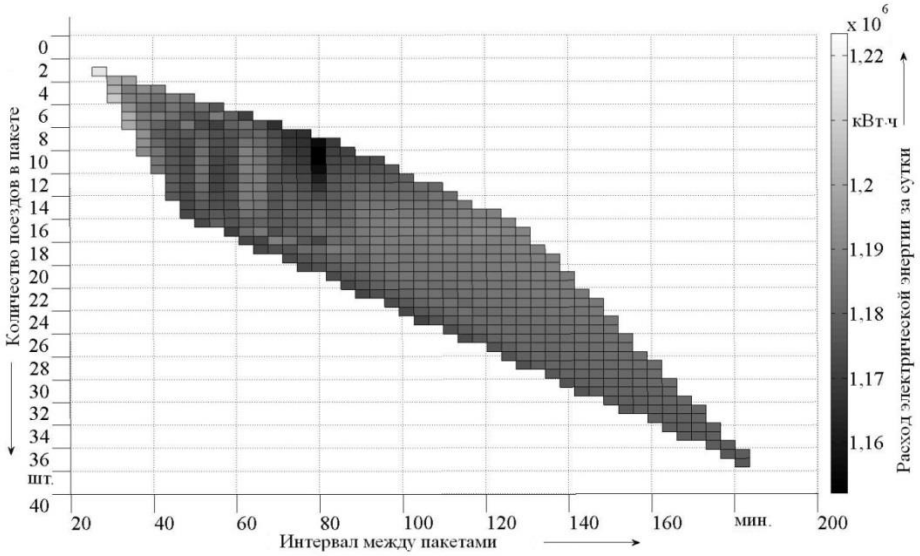


Рисунок 4 – Расход электроэнергии в зависимости от количества поездов в пакете и интервала между пакетами

В аналитическом виде функцию расхода (уравнение регрессии) электроэнергии на тягу для значений, полученных выше (см. таблицу 1), можно получить с помощью метода наименьших квадратов:

$$W = 949300,0 + 40490,0 \cdot \tau_1 + 194,6 \cdot \tau_2 - 1614,0 \cdot \tau_1^{\,2} - 58,0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 + 2,9 \cdot \tau_2^{\,2}. \qquad (13)$$

Определены доверительные интервалы с 95 %-ной надежностью для всех коэффициентов уравнения. Среди них только доверительный интервал для коэффициента перед переменной τ_2, равный 194,6, содержит нулевое значение (от –128,7 до 517,8). Это показывает, что коэффициенты уравнения (12), кроме коэффициента перед τ_2, значимо отличаются от нуля. Как показывают расчеты, для уравнений регрессии более высокого порядка в доверительных интервалах с 95 %-ной надежностью при наивысших степенях переменных содержатся нулевые значения. По полученному уравнению поверхности (13), решив систему уравнений для частных производных по τ_1 и τ_2, находим стационарную точку для функции. Получаем значения $\tau_1 = 11,1$ и $\tau_2 = 78,0$, попадающие в область допустимых значений. Однако определитель (14), составленный из частных производных второго порядка, имеет отрицательный знак, поэтому данная точка является седловой и не является точкой экстремума. Из этого следует, что наименьшее значение функции достигается на границе области [9]:

$$\begin{vmatrix} \dfrac{\partial^2 W}{\partial \tau_1^2} & \dfrac{\partial^2 W}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} \\ \dfrac{\partial^2 W}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} & \dfrac{\partial^2 W}{\partial \tau_2^2} \end{vmatrix} < 0. \qquad (14)$$

Для нахождения оптимума функции может быть использован один из известных численных методов оптимизации [11]. В рассматриваемой работе применен метод штрафных функций. По результатам расчетов данная функция имеет два минимума со значениями W_{1min} = = 1163637 и W_{2min} = 1166875 для пар значений переменных τ_1 = 8,0, τ_2 = 48,1 и τ_1 = 14,0, τ_2 = 108,0 соответственно.

Исходя из представленных результатов можно сделать вывод о том, что для произвольного электрифицированного участка железной дороги в условиях применения рекуперативного торможения существует вариант организации графика движения с минимальным расходом электроэнергии на тягу. На примере рассматриваемого участка показано, что минимальное значение расхода электроэнергии в условиях применения рекуперативного торможения достигается при следующих значениях переменных: количество поездов пакете находится в диапазоне от 8 до 10, значения интервала между поездами в пакете находятся в диапазоне 8 – 10 мин, а значения интервала между пакетами – 70 – 80 мин. Расчеты показывают, что потенциал сокращения суммарного расхода электроэнергии за счет обеспечения приема энергии рекуперации при формировании нормативного графика движения оценивается в величину 2,5 % от максимального уровня. Следует отметить, что минимальное значение расхода электроэнергии достигается на некотором множестве значений переменных, что позволяет рассматривать множество вариантов организации графика движения поездов в зависимости от решаемых задач. Предложенный подход нахождения оптимальных параметров графика движения поездов можно использовать для оценки потенциала повышения энергоэффективности перевозок на любом участке железной дороги.

Список литературы

1. Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам высокой энергетической эффективности в зависимости от применяемых технологий и технических решений и вне зависимости от характеристик объектов, осуществление инвестиций в создание которых является основанием для предоставления инвестиционного налогового кредита, и перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам высокой энергетической эффективности на основании соответствия объектов установленным значениям индикатора энергетической эффективности, осуществление инвестиций в создание которых является основанием для предоставления инвестиционного налогового кредита: Постановление Правительства РФ от 29 июня 2013 № 637 // Собрание законодательства РФ. – 05 августа 2013 г. – № 31.

2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Текст]: Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 г. № 2718р. – М., 2011. – 97 с.

3. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

4. Незевак, В. Л. К вопросу об управлении режимом работы накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения [Текст] / В. Л. Незевак // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. 425 с.

5. Вильгельм, А. С. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения [Текст] / А. С. Вильгельм, В. И. Гутников, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 1 (17). – С. 50 – 57.

6. Сидорова, Е. А. Характеристика энергопотребления на тягу поездов в энергетическом паспорте железной дороги [Текст] / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С. 76 – 80.

7. 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.

8. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях рекуперации электроподвижного состава / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2014. – № 2. – С. 106 – 111.

9. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: Учебник [Текст] / Г. М. Фихтенгольц. – СПб: Лань, 2009. – 656 с.

10. Амосов, А. А. Вычислительные методы [Текст] / А. А. Амосов. – СПб: Лань, 2014. – 672 с.

References

1. *Ob utverzhdenii perechnja obektov i tehnologij, kotorye otnosjatsja k obektam vysokoj jenergeticheskoj jeffektivnosti v zavisimosti ot primenjaemyh tehnologij i tehnicheskih reshenij i vne zavisimosti ot harakteristik obektov, osushhestvlenie investicij v sozdanie kotoryh javljaetsja osnovaniem dlja predostavlenija investicionnogo nalogovogo kredita, i perechnja obektov i tehnologij, kotorye otnosjatsja k obektam vysokoj jenergeticheskoj jeffektivnosti na osnovanii sootvetstvija obektov ustanovlennym znachenijam indikatora jenergeticheskoj jeffektivnosti, osushhestvlenie investicij v sozdanie kotoryh javljaetsja osnovaniem dlja predostavlenija investicionnogo nalogovogo kredita*. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 29.06.2013 № 637*. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii of 05.08.2013 no.31* (About the approval of objects and technologys, which are relating to the objects of the high energy efficiency depending on the objects' characteristics, the investment's realization in which creation is a base for provision of investment tax credit and a list of objects and technologys, which are relating to the objects of the high energy efficiency on the ground of the object's accordanceto the fixed value of the energy efficiency's indicator, the investment's realization in which creation is a base for provision of investment tax credit: The Government Regulation of the Russian Federation of 29.07.2013 N 637. The Legislation Gathering of the Russian Federation. – 05.09.2013 no. 31)

2. *Jenergeticheskaja strategija holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda. Rasporjazhenie OAO «RZhD» ot 15.12.2011 № 2718r*. (Energy strategy of the holding company «Russian railroad» for 2015 year and in outlook till 2030 year. Instruction of OAO «RZhD» of 15 december 2011 year no. 2718r) Moscow, 2011.

3. *Pravila tjagovyh raschetov dlja poezdnoj raboty* (The rules of the traction calculation for the train work), Moscow: Transport Publ., 1985, 287 p.

4. Nezevak, V. L. In regard to the question of the operating mode's control of the electric energy storage unit in the system of electric traction system [K voprosu ob upravlenii rezhimom raboty nakopitelja jelektrojenergii v sisteme tjagovogo jelektrosnabzhenija]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Pribory i metody izmerenij, kontrolja kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the 4th All-Russian theoretical and practical conference with the international partnership «Equipment and methods of dimensions, quality control and diagnostic in the industry and transport»). – Omsk State Transport University. Omsk, 2013. 425 p.

5. Vil'gel'm, A. S. , Gutnikov V. I., Nikiforov M. M. The approbation of the calculated model of the railroad's electric traction for the estimation of the potential energy efficiency of the regenerative braking [Aprobacija raschetnoj modeli sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija zheleznyh dorog postojannogo toka dlja ocenki potenciala jenergojeffektivnosti rekuperativnogo tormozhenija]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 1 (17), pp. 50 – 57.

6. Sidorova, E. A., Davydov A. I. The description of the power consumpyion for train's traction in the railroad's energy passport [Harakteristika jenergopotreblenija na tjagu poezdov v jenergeticheskom pasporte zheleznoj dorogi]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 4 (4), pp. 76 – 80.

7. Nikiforov, M. M., Kashtanov A. L., Kandaev V. A. The method of the potential of the regenerative braking's energy efficiency [Metodika ocenki potenciala jenergojeffektivnosti primenenija rekuperativnogo tormozhenija]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 1 (9), pp. 72 – 78.

8. Cheremisin, V. T., Vilgelm A. S., Nezevak V. L. The assessment of the technology wastes in the traction grid in the conditions of the electric rolling train's recuperation [Ocenka tehnologicheskih poter' v tjagovoj seti v uslovijah rekuperacii jelektropodvizhnogo sostava] *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija – Herald of Rostov State University of Railway Transport*, 2014, no 2, pp. 106 – 111.

9. Fihtengol'c G.M. *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischislenija* (The course of the differential and integral calculation). St.Petersburg: Lan' Publ., 2009, 656 p.

10. Amosov A.A. *Vychislitel'nye metody* (Computational science). St.Petersburg: Lan' Publ., 2014, 672 p.

УДК 621.331:621.311

В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин

КОНТРОЛЬ НЕРАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье рассмотрены виды непроизводительных потерь электроэнергии в электротяге и даны плановые уровни их улучшения. Приведены основные способы определения непроизводительных потерь, которые применяются в настоящее время в ОАО «РЖД». Показан пример алгоритма определения непроизводительных потерь при нагоне графикового времени и дано его описание. Сформулированы технические результаты предлагаемого способа определения непроизводительных потерь.

Компания ОАО «РЖД» является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов, на долю которого приходится около 6 % всей вырабатываемой в России электроэнергии, 85 % которой расходуется на тягу поездов, поэтому экономия энергетических ресурсов, снижение расхода электроэнергии на тягу поездов и уменьшение удельной нормы расхода электроэнергии являются одними из ее приоритетных задач. Одно из таких направлений оптимизации энергозатратности основной деятельности ОАО «РЖД» – это уменьшение доли непроизводительных потерь в электротяге, величина которых составляет 8 – 9 % от общего расхода на тягу. Актуальность данного вопроса нашла отражение в Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года, где была отмечена положительная динамика изменения основных факторов, влияющих на удельный расход ТЭР на тягу поездов и установлены следующие плановые уровни их улучшения, достижение которых позволит снизить удельный расход ТЭР на тягу поездов до 7 % (таблица) [1].

К непроизводительным потерям электроэнергии в электротяге относятся потери электроэнергии [2]

– в режиме простоя в депо или на станционных путях в ожидании работы;

– у запрещающих сигналов;

– на неграфиковые остановки;
– при проследовании мест с ограничением скорости;
– при нагоне графикового времени пассажирским поездом;
– при одиночном следовании локомотивов.

Динамика изменения основных факторов, наиболее влияющих на удельный расход ТЭР

Показатель	Плановый годовой уровень изменения показателя, %
Средний вес грузового поезда	+1,0
Коэффициент участковой скорости грузового поезда	+0,5
Нагрузка на ось грузового вагона	+0,5
Доля порожнего пробега грузовых вагонов	–1,5
Продолжительность прогрева локомотивов в ожидании работы	–5,0
Задержки у запрещающего сигнала	–5,0
Количество ограничений скорости движения поездов	–5,0
Количество неграфиковых остановок поездов	–2,5
Время нагона пассажирских поездов	–2,0

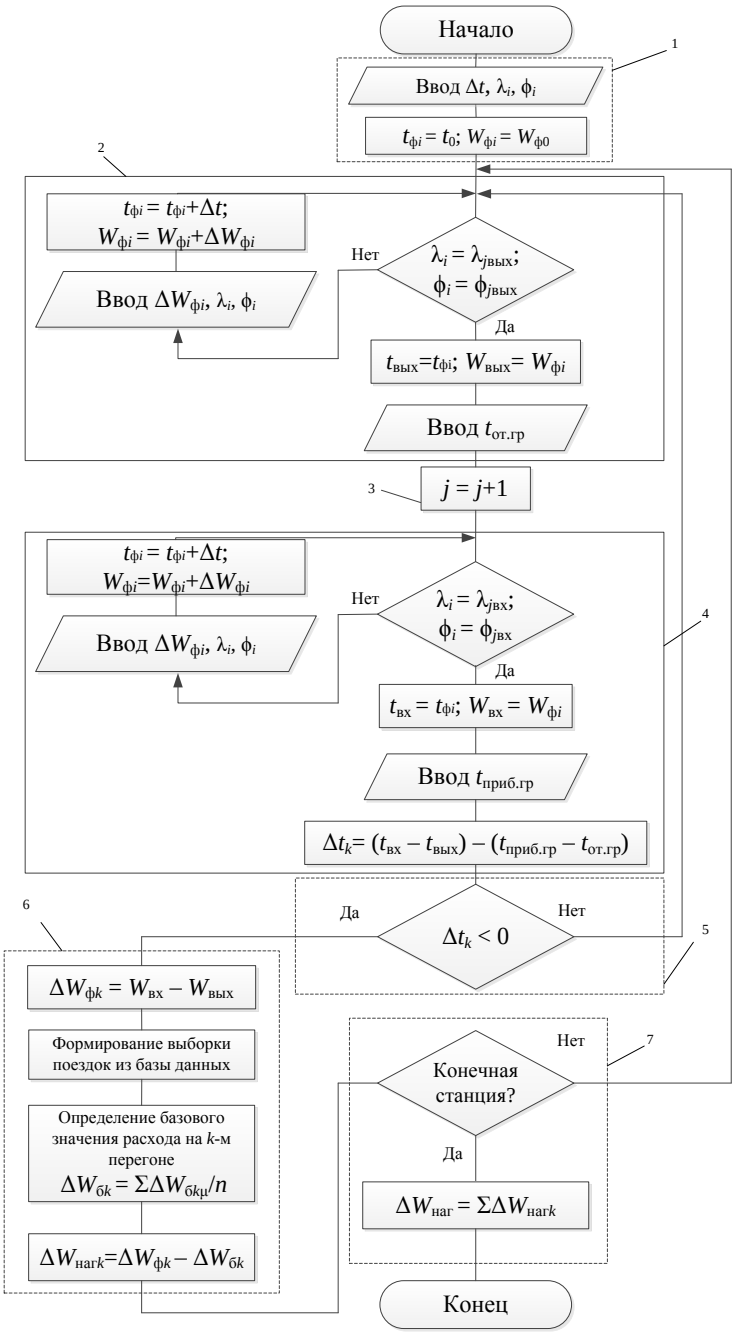
В настоящее время на сети железных дорог России непроизводительные потери электрической энергии определяются в удельном выражении в соответствии с рекомендациями источников [3, 4]. Согласно данным нормативным документам удельные потери электроэнергии определяются машинистом-инструктором по теплотехнике локомотивного депо на основе пооперационных норм, полученных в результате контрольных замеров расхода электрической энергии для каждой серии тягового подвижного состава с учетом условий его эксплуатации. Недостатком данного способа является невозможность учета влияния на конечный результат профиля пути, длины и параметров состава и ряда других факторов. Также данный способ не позволяет оценить величину абсолютного значения непроизводительных потерь электроэнергии. Ко всему прочему при вводе в эксплуатацию новых серий электровозов требуется проведение дополнительных исследований для определения соответствующих удельных значений расхода электроэнергии.

Известен также способ [5], использующий другой принцип контроля потребления электроэнергии средствами транспорта, и в частности электроподвижным составом. В его основе лежит компьютеризованный подход к учету электроэнергии. Суть способа заключается в том, что от устройства измерения электрической энергии на транспортном средстве с неким временным интервалом принимаются и заносятся в память запоминающего устройства данные, которые указывают текущие значения потребления энергии средством транспорта. Затем из измеренных данных определяется потребление энергии на отдельном участке пути. При этом определение положения транспорта осуществляется посредством системы GPS, Galileo, пассажирской информационной системы, посредством ручного ввода водителем или по ориентирам. Затем из банка данных извлекаются сравнительные данные, которые указывают потребление энергии средством транспорта на предшествующих поездках на этом участке пути. Результат сравнения в зависимости от знака характеризует либо уровень экономии электрической энергии по поездке, либо ее потери в сравнении с предыдущими поездками. Данный способ применяется для оценки эффективности вождения транспортного средства на участке различными водителями (машинистами), однако не может быть использован для определения непроизводительных затрат энергии, так как границы участков, охватывающих торможение, простой поезда, движение с ограниченной скоростью и разгон, не являются фиксированными и заранее не известны, а банк данных запоминающего устройства не содержит информацию о графиковом времени движения поезда по участку.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что актуальным является создание новых технических решений, которые могли бы позволить с достаточной степенью точности определять непроизводительные потери электроэнергии. В частности, данную проблему можно решить при создании автоматизированной системы мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса (АСМЭПП) [6, 7]. В предлагаемом способе для

определения непроизводительных потерь электрической энергии используются данные одной из подсистем АСМЭПП: бортовых информационно-измерительных комплексов, позволяющих вести запись результатов измерения электрической энергии с заданным интервалом времени и оснащенных системами глобального спутникового позиционирования или иными средствами определения местоположения электроподвижного состава. По результатам каждой поездки получают массив данных, в котором каждому моменту времени t, зафиксированному с интервалом Δt, соответствуют измеренные значения фактического расхода электроэнергии с учетом рекуперации $W_ф$, фактического времени $t_ф$ и координат местоположения. База данных результатов всех поездок хранится на специальном сервере.

В качестве примера на рисунке представлен алгоритм обработки данных поездки с целью выявления моментов нагона графикового времени и расчета вызванных им непроизводительных потерь электроэнергии. Тело алгоритма условно можно разбить на семь функциональных блоков.



Блок-схема процесса определения непроизводительных потерь электроэнергии при нагоне графикового времени на основании данных бортовых информационно-измерительных комплексов

В блоке 1 выполняется ввод интервала измерений Δt и начальных координат (φ_i; λ_i) и задаются фактическое время начала поездки (t_0) и начальные показания счетчика электроэнергии с учетом рекуперации ($W_{ф0}$).

В блоке 2 определяется момент выхода поезда со станции отправления, остановка на которой предусмотрена нормативным графиком движения пассажирских поездов. Для этого регистрируемые координаты местоположения поезда в каждый *i*-й момент времени анализируются на предмет их соответствия координатам выходного светофора станции отправления, содержащимся в соответствующей базе данных. В момент совпадения этих координат фиксируется фактическое время выхода поезда со станции ($t_{вых}$) и показание счетчика электроэнергии с учетом рекуперации в данный момент времени ($W_{вых}$). В этом же блоке вводится время отправления поезда со станции в соответствии с нормативным графиком ($t_{от.\,гр}$), получаемое из автоматизированной системы, содержащей информацию о нормативном и исполненном графиках движения.

В блоке 3 производится смена индекса станции. Дальнейший анализ местоположения поезда осуществляется относительно следующей по ходу движения станции.

В блоке 4 определяется момент входа поезда на станцию прибытия, остановка на которой предусмотрена нормативным графиком движения. Для этого регистрируемые координаты местоположения поезда в каждый *i*-й момент времени анализируются на предмет их соответствия координатам входного светофора станции прибытия, содержащимся в соответствующей базе данных. В момент совпадения этих координат фиксируются фактическое время входа поезда на станцию ($t_{вх}$) и показание счетчика электроэнергии с учетом рекуперации в данный момент времени ($W_{вх}$). В этом же блоке вводится время прибытия поезда на станцию в соответствии с нормативным графиком ($t_{приб.\,гр}$). Далее вычисляется разница между фактическим временем хода поезда между станциями отправления и прибытия и графиковым временем хода поезда по данному (*k*-му) межстанционному перегону:

$$\Delta t_k = (t_{вх} - t_{вых}) - (t_{приб.гр} - t_{от.гр}). \quad (1)$$

В блоке 5 выполняется анализ значения выражения (1) на предмет наличия или отсутствия факта нагона графикового времени поездом на *k*-м межстанционном перегоне. Для этого проверяется условие $\Delta t_k < 0$. В случае если условие не выполняется, считается, что факта нагона не было, и алгоритм повторяется со второго блока для следующего межстанционного перегона. Если условие выполняется, то считается, что на *k*-м межстанционном перегоне имел место нагон поездом графикового времени, и осуществляется переход к следующему блоку алгоритма. При этом значение Δt_k является временем нагона.

В блоке 6 производится расчет дополнительного расхода (непроизводительных потерь) электрической энергии на *k*-м межстанционном перегоне, обусловленного нагоном поездом графикового времени.

Для этого вычисляется абсолютное значение расхода электроэнергии с учетом рекуперации на *k*-м межстанционном перегоне по формуле:

$$\Delta W_{фk} = W_{вх} - W_{вых}. \quad (2)$$

Далее осуществляется вычисление базового значения расхода электроэнергии для участка, соответствующего моменту исследуемого подвижного состава. Для этого из базы данных формируется выборка поездок с аналогичными параметрами за предшествующий период времени для поездов, проследовавших данный участок без нагона графикового времени.

Базовый расход электроэнергии определяется по формуле:

$$\Delta W_{бk} = \frac{\sum_{\mu=1}^{n} \Delta W_{бk\mu}}{n}, \quad (3)$$

где $\Delta W_{бk\mu}$ – расход электроэнергии на *k*-м межстанционном перегоне по μ-й поездке, выполненной без нагона графикового времени в предшествующем отчетном периоде;

n – количество μ-х поездок, выполненных без нагона графикового времени в предшествующем отчетном периоде.

Далее определяется величина непроизводительных потерь электрической энергии, обусловленных нагоном графикового времени:

$$\Delta W_{\text{нагk}} = \Delta W_{\text{ф}k} - \Delta W_{\text{б}k}. \quad (4)$$

В блоке 7 выполняется проверка прибытия поезда на конечную станцию. В случае если текущая станция не является конечной, алгоритм повторяется со второго блока для следующего межстанционного перегона. В противном случае вычисляется суммарное по поездке значение дополнительного расхода (потерь) электроэнергии, обусловленных нагоном поездом графикового времени:

$$\Delta W_{\text{наг}} = \sum_{k=1}^{m} \Delta W_{\text{нагk}}, \quad (5)$$

где m – количество k-х межстанционных перегонов.

Удельные потери электрической энергии при нагоне графикового времени определяются по формуле:

$$\delta_{\text{нг}} = \frac{\Delta W_{\text{наг}}}{\Delta t_{\text{наг}}}, \quad (6)$$

где $\Delta t_{\text{наг}}$ – время нагона, определяемое по формуле, аналогичной (5).

Результатом предлагаемого способа определения непроизводительных потерь является следующее:

повышение точности определения непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом за счет использования данных о фактическом значении потребления (возврата) электроэнергии электроподвижным составом в процессе торможения, простоя, движения с ограниченной скоростью и разгона до установленной скорости;

реализация возможности определения не только удельных, но и абсолютных значений непроизводительных потерь электроэнергии;

устранение необходимости проведения дополнительных исследований для определения эмпирических значений удельного расхода электроэнергии на торможение, простой, движение с ограниченной скоростью и разгон поезда для новых серий электроподвижного состава, вводимых в эксплуатацию.

Создание АСМЭПП в первую очередь позволит повысить уровень ответственности всех участников перевозочного процесса за рациональное использование ТЭР за счет разработки и внедрения механизма отнесения дополнительных энергозатрат, вызванных, например, нагонами при нарушениях графиков движения поездов в результате временных ограничений скорости движения поездов и неграфиковых остановок, на инициатора таких необоснованных ограничений.

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.

2. Гапанович, В. А. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов № 512 [Текст] / В. А. Гапанович. – М., 2014. – 47 с.

3. Инструкция по техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов ЦТ-2564 / Утв. МПС СССР от 20.05.1967. М.: Транспорт, 1968. 48 с.

4. Морозов, В. Н. Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» № 1808р [Текст] / В. Н. Морозов. – М., 2007. – 19 с.

5. Пат. 2534598 Российская Федерация, МПК B 60 L 3/12. Компьютеризованный контроль потребления энергии средства транспорта [Текст] / Хааф Ш., Кесснер М. (Германия); заявитель и патентообладатель Сименс Акциенгезелльшафт. – № 2011154039/11; заявл. 14.05.2010; опубл. 27.11.2014.

6. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 108 – 114.

7. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 87 – 91.

References

1. Gapanovich V. A., Epifancev S. N., Ovsejchuk V. A. *Jenergeticheskaja strategija i jelektrifikacija rossijskih zheleznyh dorog* (Energy Strategy and the electrification of the Russian railways). Moscow: Jeko-Press Publ., 2012, 196 p.

2. Methods of analysis and forecasting of energy resources consumption for train traction / Approved by decree of JSC «Russian Railways» at 26.12.2014, № 512.

3. Instructions on technical regulation of electrical energy and fuel consumption by locomotives for traction CT-2564 / Approved by decree of MPS USSR at 20.05.1967. Moscow: «Transport», 1968. 48 p.

4. Regulations on planning and rationing of fuel and energy resources for train traction in JSC «Russian Railways» / Approved by decree of JSC «Russian Railways» at 17.09.2007, № 1808p.

5. Haaf Stefan, Kessner Martin *Patent RU 2011154039 C2*, 14.05.2010.

6. Cheremisin V. T., Ushakov S. Y., Kashtanov A. L. Global automatic electric power measuring system for rolling stock [Edinaya avtomatizirovannaya sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoyannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 3 (15), pp. 108 – 114.

7. Cheremisin V. T., Pashkov D. V., Ushakov S. Y. Automated monitoring of energy efficiency operation of the electric rolling stock of JSC «Russian Railways» [Avtomatizirovannyiy monitoring energeticheskoy effektivnosti rabotyi elektropodvizhnogo sostava OAO «RZhD»]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 87 – 91.

УДК 004.932

Н. Д. Зачатейский, А. А. Аржанников, Е. А. Альтман

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА «ВЫДЕЛЕНИЯ ФОНА» ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В статье описаны подходы по извлечению из видеоряда областей, относящихся к подвижным объектам, которые могут являться причиной возникновения опасной ситуации на железнодорожном переезде. Предлагаемый подход позволит улучшить качество выделения подвижного объекта, что даст возможность сократить время обработки изображения для идентификации подвижных объектов, с целью определения степени риска. Для оценки качества алгоритмов было проведено моделирование в разработанном программном продукте.

Современный уровень развития цифровых способов обработки видеоинформации открывает широкие перспективы в развитии направления науки и техники, называемого компьютерным зрением. Основными задачами, решаемыми техническими средствами, являются выявление и анализ из видеоданных (или последовательности графических изображений) требуемых объектов, их положение и поведение с целью классификации или организации безопасности наблюдаемого объекта.

В данном случае наблюдаемым объектом является железнодорожный переезд, оборудованный устройствами видеонаблюдения. Исходя из того, что переезд как часть железной дороги является зоной повышенной опасности, и несмотря на использование мер обеспечения безопасности (сигналы светофоров, шлагбаумы, автоматические заграждения и т. д.), существует вероятность возникновения ситуаций, связанных с угрозой жизни и здоровью людей. Своевременный анализ обстановки на переезде позволяет организовать заблаговременное предупреждение участников движения или устройств обеспечения безопасности переезда. Для обеспечения более полного и, возможно, раннего информирования предлагается использовать алгоритмы компьютерного зрения. Получение данных из видеоряда о положении и перемещении присутствующих на переезде объектов и прогнозирование их дальнейших передвижений будет способствовать снижению вероятности возникновения опасной ситуации, уменьшению уровня удельного расхода электроэнергии [1], повышая тем самым качество и эффективность железнодорожных перевозок. В статье описаны алгоритмы компьютерного зрения, позволяющие получить область видеоряда, содержащую в себе движение с целью дальнейшего анализа на предмет наличия некого признака – нахождение в опасной зоне, опасная скорость движения в опасном направлении, принадлежность подвижного объекта к группе способных повлиять на работоспособность переезда или жизнь и здоровье людей.

В области компьютерного зрения в настоящее время создано достаточно большое количество алгоритмов обработки видеоинформации, из которых основными являются алгоритмы поиска движения и алгоритмы извлечения блоков информации (детекторы лиц, цвета, шаблонов и т. п.). Задача выделения движения (подвижных объектов) может являться промежуточным этапом в каскаде алгоритма анализа видео, так как ее решение позволяет выделить участки, содержащие в себе некое действие, требующее дальнейшей идентификации (например, идентификации личности, классификации подвижного объекта, или же анализа параметров движения – направление, скорость и др.). Приведем основной подход к решению данной задачи.

Для обнаружения движения существует известный метод выделения фона (*Background subtraction*) [2], который основывается на понятии «заднего» (*Background*) и «переднего» (*Foreground*) фона. В начале анализа видеоряда первое изображение (первый кадр видеоряда) принимается за задний фон. В памяти сохраняются параметры всех пикселей данного кадра. Для всех последующих кадров выполняется операция сравнения параметров каждого из пикселей. Все отличающиеся по параметрам пиксели считаются передним фоном. В случае если изображение не изменилось, передний план будет условно равен 0, иначе – отличен от 0. По полученным значениям можно судить о наличии движения и его параметрах.

В матричном представлении алгоритм выглядит следующим образом (формулы (1) и (2)):

$$M\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n1} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} - M^{|}\begin{bmatrix} P^{|}_{11} & P^{|}_{12} & \dots & P^{|}_{1m} \\ P^{|}_{21} & P^{|}_{22} & \dots & P^{|}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P^{|}_{n1} & P^{|}_{n1} & \dots & P^{|}_{nm} \end{bmatrix} = R^{|}\begin{bmatrix} P^{||}_{11} & P^{||}_{12} & \dots & P^{||}_{1m} \\ P^{||}_{21} & P^{||}_{22} & \dots & P^{||}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P^{||}_{n1} & P^{||}_{n1} & \dots & P^{||}_{nm} \end{bmatrix}; \qquad (1)$$

$$R[...] = R^{|}\begin{bmatrix} \left|P_{11}^{||}\right| & \left|P_{12}^{||}\right| & ... & \left|P_{1m}^{||}\right| \\ \left|P_{21}^{||}\right| & \left|P_{22}^{||}\right| & ... & \left|P_{2m}^{||}\right| \\ ... & ... & ... & ... \\ \left|P_{n1}^{||}\right| & \left|P_{n1}^{||}\right| & ... & \left|P_{nm}^{||}\right| \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где P_{nm} – набор значений, описывающий пиксель (массив, длина которого определяется количеством цветовых каналов изображения); M, $M^{|}$, $R^{|}$ и R – матрицы, описывающие исходное изображение (задний фон), вычитаемое значение (текущий кадр), разницу кадров и абсолютную разницу кадров (передний фон)

К сожалению, данный метод имеет ряд недостатков.

Во-первых, неоднозначным является выбор так называемой точки отсчета – области изображения, которую можно считать задним планом. При движении камеры в пространстве меняется положение заднего плана на кадре. В методе выделения фона точкой отсчета является первый кадр. В результате на видеоряд накладывается требование – он должен быть записан с неподвижной камеры. В остальных случаях данный метод не пригоден, поскольку каждый последующий кадр будет оцениваться данным методом как полностью изменившийся. Это приводит к невозможности правильной качественной или количественной оценки движения.

Во-вторых, перманентное изменение положения объекта, находящегося на изображении в момент захвата точки отсчета, приводит к возникновению ошибочного обнаружения подвижного объекта.

Говоря о движении на видеоряде, нужно сказать и о том, что изменение положения объекта определяется по расстоянию от точки отсчета до любой другой точки изображения переднего плана, сохранившей свои параметры. Точки переднего плана группируются по отдельным объектам, или телам изображений.

Задача выделения тела на изображении является одной из самых сложных. Связано это со сложностью получения универсального алгоритма из-за особенностей видеоряда и самого тела. Интересующие объекты могут не иметь ярко выраженных признаков, могут сливаться с фоном, быть зашумлены или частично спрятаны за преградой, которая может быть представлена таким же объектом.

В самом простом случае требуется обнаружить не подвижные объекты, а области, содержащие «перемещение», чтобы подвергнуть их дальнейшей обработке: поиску шаблонов, лиц, определению положения и тенденции движения объекта. При использовании метода выделения фона получают области, отличные от фона. Для выделения этих областей применяются, например, алгоритмы выделения контуров объекта [3]. К сожалению, и у этого подхода есть недостатки:

если объект имеет преграду, разделяющую его на несколько частей (человек или автомобиль, движущийся за перилами, невысоким прозрачным забором или преграждаемый линиями электропередач), контурный анализ в общем виде выделит несколько областей;

если объекты в процессе движения пересекаются, то их области движения тоже пересекаются, поэтому контурный анализ без дополнительной обработки распознает такие объекты как один большой объект;

если объект сливается с фоном, то в некоторых областях изображения разница между фоном и участками текущего кадра будет «близка к 0», в результате область движения может разбиться на несколько частей (например, если этот участок разбивает исходный объект на две части).

Для устранения или снижения влияния описанных выше недостатков предлагается следующий подход. Будем находить разницу между соседними кадрами (предыдущим и текущим кадрами), а не между первым и текущим. Это поможет избежать проблем, связанных с

перманентными изменениями изображения, а также неспособности алгоритма работать после изменения положения камеры. При нахождении разницы между текущим и предыдущим кадрами алгоритм ведет себя некорректно только в момент перемещения камеры. В случае нахождения разницы первого и текущего кадров алгоритм некорректен как во время, так и после перемещения камеры. Примеры приведены на рисунках 1 и 2.



а б в

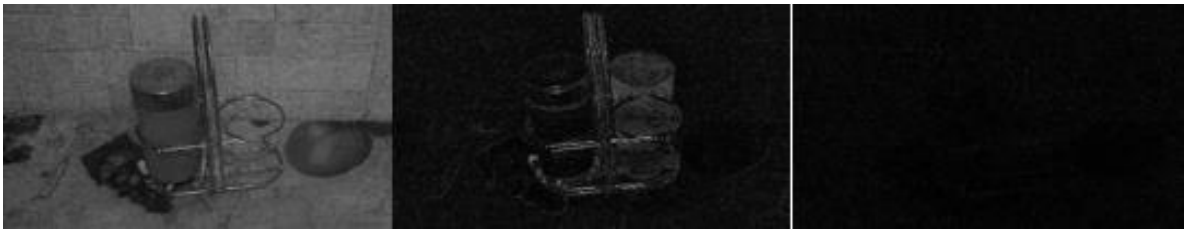
Рисунок 1 – Результаты работы алгоритмов при неподвижной камере с шумом: а – исходное изображение; б – передний план; в – разница соседних кадров



а



б в г



д е ж

Рисунок 2 – Результаты работы алгоритмов: а – первый кадр; б – г – перемещение камеры, д – ж – извлечение объекта; г, ж – исходное изображение; в, е – передний план; б, д – разница соседних кадров

Как видно из рисунка 2, алгоритм извлечения фона не способен обработать кардинальные изменения первого кадра, в то время как алгоритм сравнения соседних кадров не учитывает начальных условий. Из-за отсутствия явного движения изображения на рисунке 2, г, ж практически не содержат полезной информации.

Таким образом, алгоритм получения требуемой информации, базирующийся на распознавании движения за счет разницы соседних кадров, может быть представлен схемой, изображенной на рисунке 3.

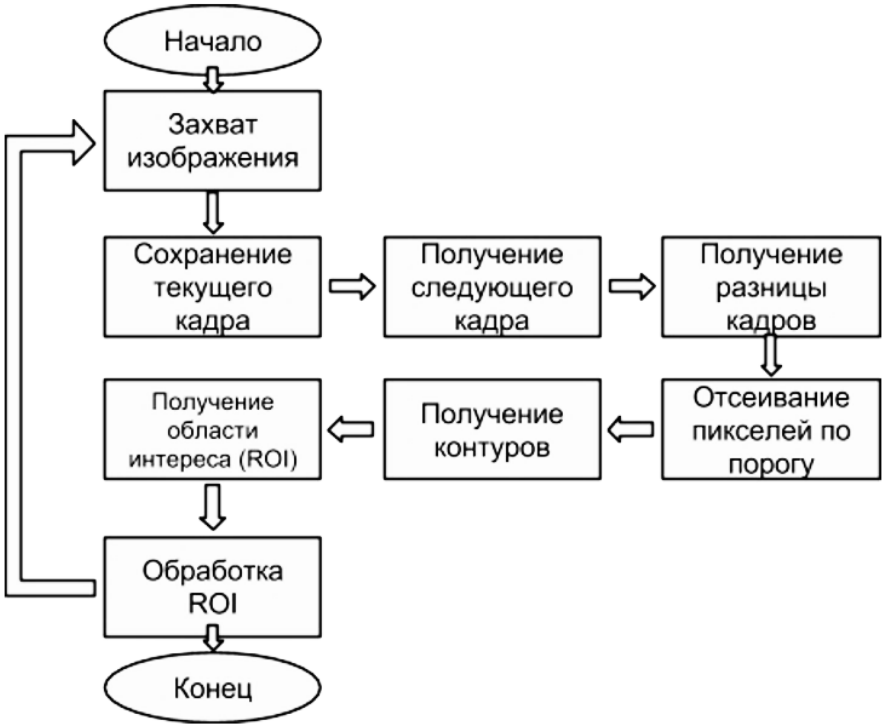


Рисунок 3 – Схема алгоритма распознавания движения

Как видно из рисунка 3, основным результатом выполнения алгоритма является получение и обработка области интереса *ROI* (*Region Of Interests*) [4]. Под *ROI* понимается участок изображения, в котором может содержаться полезная в анализируемом кадре информация. Использование *ROI* значительно сокращает время работы с кадром, так как дальнейшей обработке подвергаются не все пиксели, а только попадающие в *ROI*. Получение *ROI*, его анализ, расположение и прогноз движения объекта внутри *ROI* позволят определить, может ли создать подвижный объект опасную ситуацию на железнодорожном переезде.

Примером подобных объектов в случае с железнодорожным переездом может являться человек. Для сравнения качества получения *ROI* была создана программная реализация данного алгоритма и метода извлечения фона на языке программирования *Java* с использованием библиотеки *OpenCV* [5] в среде разработки *Eclipse*. В качестве сравниваемых параметров были выбраны геометрические размеры полученных *ROI* (в пикселях), в особенности площадь, так как этот показатель определяет количество информации, поступающее на следующий этап обработки. Эталонное значение было выбрано исходя их минимальной площади прямоугольника, описывающего контуры наблюдаемого человека. Полученные результаты обнаружения подвижного объекта представлены в таблице и на рисунке 4.

Из обобщенных результатов моделирования видно, что

при изменении фона и перемещении камеры алгоритм более адекватно обрабатывает перманентные изменения видеоряда по сравнению с методом выделения фона (рисунок 2, б – г);

в случае с извлечением объекта алгоритм сравнения соседних кадров не воспринимает его область как постоянно требующую обработки (рисунок 2, д – ж);

ROI, полученные при помощи сравнения соседних кадров, больше соответствуют границам подвижного объекта (см. таблицу 1, рисунок 4).

Результаты работы алгоритмов выявления подвижных объектов

Название параметра	Ширина *ROI*, Pixels	Высота *ROI*, Pixels	Площадь *ROI*, Pixels^2
Эталон	80	182	14560
Выделение фона	125	277	34525
Сравнение соседних кадров	106	187	19822



а б

Рисунок 4 – *ROI*, полученные по алгоритмам обнаружения движения: а – алгоритм выделения фона; б – алгоритм сравнения соседних кадров (пунктиром в обоих случаях выделен эталонный *ROI*)

Очевидными недостатками приведенного подхода обнаружения движения являются следующее:

возможность анализа только полностью подвижных объектов. При прекращении движения части объекта она становится «невидимой» для алгоритма и поэтому не будет учтена при получении *ROI*. Это может привести к ошибке распознавания или определения положения объекта. В случае с железнодорожным переездом предполагается, что объекты будут анализироваться с расстояния, значительно большего, чем сами объекты, а значит, погрешность из-за «неполноты движения» будет сравнительно мала. Например, если человек движется, то движением его руки можно пренебречь. Некоторые из наблюдаемых объектов (автомобили) не способны к «неполному движению»;

ухудшение входных данных для алгоритмов контурного анализа. Вследствие анализа только соседних кадров контур подвижного объекта может получиться разорванным ввиду малых изменений между кадрами, т. е. нет явной разницы между ними, а значит, объект не будет воспринят как одно целое. Для такой ситуации рекомендуется прибегнуть к искусственному объединению соседних контуров с целью получения общего *ROI*.

Таким образом, можно утверждать, что применение алгоритма поиска движения при помощи сравнения соседних кадров позволяет с большей точностью анализировать подвижные объекты по сравнению с алгоритмом, представленным в источнике [2], который был взят за основу при проведении данного исследования, так как значение площади полученного *ROI* ближе к эталонному значению. Рассмотренный подход, конечно, имеет недостатки, но в случае анализа ситуации на железнодорожном переезде позволяет

прибегнуть к использованию подвижных камер наблюдения, увеличив тем самым зону наблюдения;

анализировать объекты «целиком», игнорируя «неполные» перемещения;

анализировать положения части «разбитого» объекта, полученного после контурного анализа, на предмет нахождения в опасной зоне – ведь даже если часть автомобиля или человека оказалась на железнодорожном переезде, то этот момент должен быть обработан.

Полученные *ROI* могут быть использованы для дальнейшего анализа [6] с целью получения достаточной информации для принятия решения по текущей ситуации на переезде.

Список литературы

1. Ананьева, Н. Г. Снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов при внедрении устройств контроля ситуации на железнодорожном переезде [Текст] / Н. Г. Ананьева // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2010. – № 1 (87). – С. 158 – 160.

2. Bouwmans, T. Handbook on «Background modeling and foreground detection for video surveillance: traditional and recent approaches, implementations, benchmarking and evaluation». CRC Press, Taylor and Francis Group. June 2014.

3. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ. Приложения к обработке изображений и сигналов [Текст] / Я. А. Фурман. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.

4. Brinkmann, R. The art and science of digital compositing // Morgan kaufmann. – 1999. – 184 p.

5. Bradski, G. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library / O'Reilly Media. Inc., 2008.

6. Parker, J. R. Algorithms for image processing and computer vision // John Wiley & Sons, 2010.

References

1. Ananeva N. G. Reduction in specific energy consumption for traction in the implementation of monitoring devices situation at a railway crossing [Snizhenie udel'nogo rashoda jelektrojenergii na tjagu poezdov pri vnedrenii ustrojstv kontrolja situacii na zheleznodorozhnom pereezde]. Omsk: *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2010, pp. 158 – 160.

2. Bouwmans, T. Handbook on «Background modeling and foreground detection for video surveillance: traditional and recent approaches, implementations, benchmarking and evaluation», CRC Press, Taylor and Francis Group, June 2014.

3. Furman Ja. A. *Vvedenie v konturnyj analiz. Prilozhenija k obrabotke izobrazhenij i signalov* (Introduction to contour analysis and its applications to image and signal processing). Moscow: Fizmatlit, 2003, 592 p.

4. Brinkmann, R. The art and science of digital compositing. Morgan kaufmann. – 1999. – 184 p.

5. Bradski, G. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library / O'Reilly Media, Inc., 2008.

6. Parker, J. R. Algorithms for image processing and computer vision. – John Wiley & Sons, 2010.

УДК 004.93

А. Е. Сулавко, А. В. Еременко, Е. А. Левитская

РАЗГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СКРЫТОГО МОНИТОРИНГА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ: ПОРТРЕТ НЕЛОЯЛЬНОГО СОТРУДНИКА[1]

Работа посвящена проверке истинности гипотезы о том, что информация о действиях пользователя в компьютерной системе, полученная на основе скрытого мониторинга стандартных периферийных устройств, позволит своевременно распознать нелояльное поведение и предотвратить реализацию внутрен-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-37-50536).

ней угрозы информационной безопасности, что актуально для информационных систем железнодорожного транспорта.

В настоящее время важной задачей обеспечения информационной безопасности является разработка средств защиты от утечек конфиденциальных данных [1]. Суммарный ущерб от утечек корпоративных секретов, нанесенный компаниям в мире за 2013 г. по данным Zecurion Analytics составил более 25 млрд долл., и с каждым годом оценки ущерба увеличиваются. По мнению многих экспертов, главной проблемой защиты информационных ресурсов от несанкционированного изъятия и использования стала проблема нейтрализации человеческого фактора. Примеров несанкционированного вхождения в информационно-вычислительную систему в литературе приводятся множество. Другая проблема: инсайдер, обладающий правами доступа к конфиденциальному документу, который может обойти защиту информации от утечек. Так, в 2010 г. на сайте Wikileaks были опубликованы сотни тысяч документов США о военных операциях в Афганистане, Ираке. В том же году были похищены данные о PIN-кодах 7 тысяч пластиковых банковских карт Альфа-банка. В январе 2013 г. Э. Сноуден раскрыл секретные данные Агентства национальной безопасности США (АНБ). Информация АНБ была защищена с помощью самых современных технологий, но предотвратить ее хищение не удалось.

В открытой литературе не удалось обнаружить оценок ущерба от хищений конфиденциальных данных из информационных и информационно-управляющих систем железнодорожного транспорта (ИСЖДТ и ИУСЖДТ). Тем не менее рассмотренные выше проблемы актуальны и для железнодорожной отрасли страны, в информационных системах которой в силу стратегического значения обрабатываются сведения, составляющие государственную тайну, например, сведения о воинских перевозках. В частности, такими системами являются автоматизированные системы управления перевозками грузов (АСОУП), автоматизированные системы управления пассажирскими перевозками (АСУ-ПП), комплексные автоматизированные информационно-справочные подсистемы АСУ-ПП (ЭКАСИС), система резервирования и продажи билетов («Экспресс-2»), единые центры диспетчерского управления (ЕЦДУ), система учета, контроля дислокации, анализа использования и регулирования вагонного парка (ДИСПАРК), автоматизированная система контроля за использованием и продвижением контейнеров (ДИСКОН), автоматизированная система фирменного транспортного обслуживания (АКС ФТО), автоматизированные системы управления сортировочными (АСУ СС), грузовыми (АСУ ГС) станциями и контейнерными пунктами (АСУ КП) и др.

На сегодняшний день важнейшей задачей является создание эффективной организационно-технической системы обеспечения требуемого уровня антитеррористической и антикриминальной безопасности железнодорожного транспорта. Для решения сформулированной задачи положениями «Стратегии развития железнодорожного транспорта», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р, предусмотрено оснащение системами мониторинга состояния защищенности всех критически важных и потенциально уязвимых объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта от актов незаконного вмешательства. Это касается не только вокзалов и вокзальных комплексов, но и любых информационных и компьютерных систем, эксплуатируемых на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта. Существенным продвижением в этом направлении является создание сертифицированного ФАПСИ программно-аппаратного комплекса «Щит-почта Интернет», который позволит закрыть несанкционированный доступ в служебные сети ОАО «РЖД».

Следует отметить, что информационные технологии железнодорожного транспорта ориентированы на взаимодействие с системами других отраслей для сокращения задержек при транспортировке грузов. Поэтому утечка информации может происходить «за пределами» используемой ИСЖДТ или ИУСЖДТ. Требуется комплексный мониторинг любых информационных систем вне зависимости от их назначения. Любой оператор на объектах железнодорожного транспорта может оказаться злонамеренным инсайдером, имеющим доступ к соот-

ветствующей его компетенции информации, а также необходимым для обработки этой информации информационным системам и функциям. Таким образом, необходимым условием для построения эффективной защиты является комплексный подход к мониторингу действий сотрудников в локальных сетях инфраструктуры железнодорожного транспорта, который включает в себя их непрерывную идентификацию и автоматическое определение опасного с точки зрения информационной безопасности поведения в информационной системе. Сформировалось убеждение в том, что дальнейшее усовершенствование и модернизация сложившихся направлений защиты информации не исправит ситуацию, так как изменилась постановка задачи: создать защиту от того, кому разрешено все в соответствии со служебными обязанностями [2]. Современные биометрические системы разграничения доступа часто успешно справляются с задачами идентификации и аутентификации работника, однако не в состоянии распознать лояльность сотрудников по их поведению. На предыдущем этапе исследований был предложен и исследован подход к разграничению доступа к компьютерным ресурсам на основе результатов непрерывной идентификации пользователей информационной системы [3]. Работа [3] посвящена проверке истинности гипотезы о том, что информация о действиях пользователя в компьютерной системе, полученная на основе «скрытого» мониторинга стандартных периферийных устройств, в частности, особенности работы с оконными приложениями, используемые сочетания клавиш, характер работы с «мышью» и клавиатурой, позволит своевременно распознать нелояльное поведение и предотвратить реализацию внутренней угрозы информационной безопасности. В случае подтверждения этой гипотезы решение о предоставлении доступа к отдельным информационным ресурсам может быть принято на основании данных об особенностях работы пользователя с клавиатурой, мышью и оконными приложениями в процессе профессиональной деятельности. Если поведенческий портрет работника в информационной системе существенно отличается от эталонного, доступ к ресурсам компьютерной системы может быть ограничен.

Авторами были решены следующие задачи.

1. Произведена оценка информативности следующих категорий признаков для их использования в целях распознавания нелояльного поведения пользователей компьютерных систем: особенности работы с оконными приложениями, используемые сочетания клавиш, характер работы с мышью и клавиатурой, частота запуска определенных приложений, количество выполняемых операций чтения, изменение и удаление файлов.

2. Зафиксированы и проанализированы изменения клавиатурного почерка и особенностей работы с мышью, характеризующих пользователей компьютерной системы, до и после (во время) совершения противоправных действий с конфиденциальной информацией, что отражается на результатах идентификации субъектов.

По аналогии с описанием в работе [3] был проведен эксперимент, в ходе которого осуществлялся мониторинг деятельности субъектов в компьютерных системах без совершения нарушений режима доступа к информации и во время (после) совершения данных нарушений (в отличие от [3], где нарушений режима доступа не совершалось). Студентам вуза предложено пройти тест, в ходе которого необходимо в развернутом виде ответить на ряд вопросов и выполнить несколько заданий, используя клавиатурный ввод и ввод при помощи мыши, а также популярные офисные приложения. Использование любой литературы, Интернета и флеш-накопителей строго запрещалось. В качестве мотивации для участия в эксперименте первым трем студентам, выполнившим большинство заданий правильно, был поставлен зачет. Общее количество испытуемых было равным 30 (10 из которых принимали участие в предыдущем эксперименте [3]). Эксперимент длился в течение двух часов. По окончании эксперимента часть испытуемых совершила нарушения (12 человек), часть нет. Об этом свидетельствуют результаты анализа действий, совершенных испытуемыми (все действия в операционной системе регистрировались специально разработанным программным обеспечением). Также в аудитории велось открытое видеонаблюдение, поэтому удалось определить, кто из испытуемых пользовался справочной литературой и мобильными устрой-

ствами, однако сами испытуемые не знали целей эксперимента и не подозревали, что данные видеокамеры анализируются. В результате была сформирована база признаков нелояльных сотрудников (студенты, нарушившие режим доступа), а также лояльных сотрудников, находящихся в состоянии волнения, обусловленного выполнением заданий в условиях конкуренции (студенты, выполнившие тестовые задания честно, без нарушений). Таким образом, сопоставив полученные данные, можно определить, вызваны изменения в характере работы пользователей волнением или фактом нарушения режима доступа и имеются ли данные изменения вообще.

Анализировались следующие признаки: частота запуска приложений (по аналогии с [3]), частота нажатия «горячих» клавиш (по аналогии с [3]), количество производимых операций с файлами различных разрешений (чтение, изменение, удаление), время удержания клавиш при вводе текста на клавиатуре (по аналогии с [3]), паузы между нажатием клавиш при вводе текста на клавиатуре (по аналогии с [3]), средняя скорость перемещения курсора мыши от одного элемента интерфейса к другому (по аналогии с [3]), время задержки перед осуществлением перемещения курсора мыши от одного элемента интерфейса к другому в миллисекундах (по аналогии с [3]), максимальное и среднее отклонения в пикселях от кратчайшего пути перемещения курсора мыши от одного элемента интерфейса к другому (по аналогии с [3]).

Анализ динамики запуска программ не дал положительных результатов, как и в предыдущем случае [3]. Данные о частоте запуска программ носят нерегулярный характер у всех пользователей ПЭВМ, принимавших участие в эксперименте. Эти данные существенно зависят от выполняемых задач и не могут быть использованы для распознавания лояльности поведения сотрудника в реальном времени. Для принятия каких-либо классификационных решений требуется значительно больше статистической информации о работе пользователя ПЭВМ. Аналогичные заключения были сделаны относительно использования «горячих» клавиш и выполнения операций с файлами. Имеются незначительные отклонения в интенсивности использования некоторых сочетаний клавиш при работе разных пользователей, однако данные различия сложно использовать для того, чтобы распознать нелояльность субъекта, и для его идентификации [3]. Имеются случаи спонтанного многократного использования каких-либо сочетаний клавиш при общем низком количестве таких нажатий за длительный период времени. Проанализировав полученные признаки, можно сделать вывод о том, что их нельзя использовать для быстрой идентификации субъекта и для распознавания лояльности его действий в компьютерной системе за приемлемый промежуток времени вследствие низкой информативности, по крайней мере в отрыве от контекста выполняемых субъектом задач на компьютере. Количество статистической информации, полученной в рамках эксперимента, оказалось недостаточным для более содержательных выводов.

Для получения статистической информации за более длительный период времени были повторно проанализированы данные предыдущего эксперимента [3] (эксперимент проводился в течение 15 дней). На рисунках 1 и 2 можно видеть распределение количества событий, связанных с созданием файлов различных расширений по дням для двух испытуемых. На рисунке 3 изображено распределение события открытия файла формата xls в течение дня тех же испытуемых. По рисункам 1, 2 можно видеть, что поведение испытуемого 1 более прогнозируемо (неопределенность действий меньше, испытуемый совершает почти равное число операций за определенный период времени), чем поведение испытуемого 2. Степень неопределенности поведения пользователя компьютерной системы можно оценить исходя из дисперсии фактических показателей количества произошедших событий в определенное время суток от их среднего числа, полученного в результате многократных наблюдений в это же время суток. Таким образом, наряду с детерминированной составляющей поведения пользователя обязательно присутствует неопределенная (непредсказуемая) часть поведения, обусловленная изменением выполняемых задач (возможны дополнительные поручения руководства, пользователь может выполнять несколько разноплановых задач одновременно и т. д.). Неопределенная составляющая несет в себе опасность того, что пользователь является нару-

шителем и предпринимает атаки на систему. Злоумышленник, используя неопределенную составляющую поведения законного пользователя, может также производить атаки на информационную систему. Высокая дисперсия количества произошедших событий не означает, что действия пользователя ПЭВМ являются нелояльными, однако спонтанное повышение значения этой дисперсии за контролируемый промежуток времени может являться сигналом для тревоги. Тем не менее для определения нелояльности поведения информации только о запуске программ, использовании «горячих» клавиш и производимых операциях с файлами явно недостаточно.

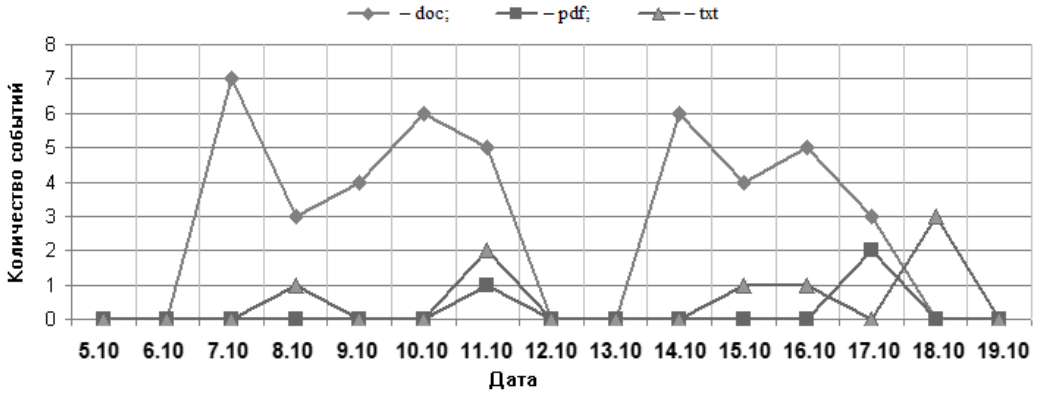


Рисунок 1 – Распределение количества событий создания файлов с различными расширениями (испытуемый 1)

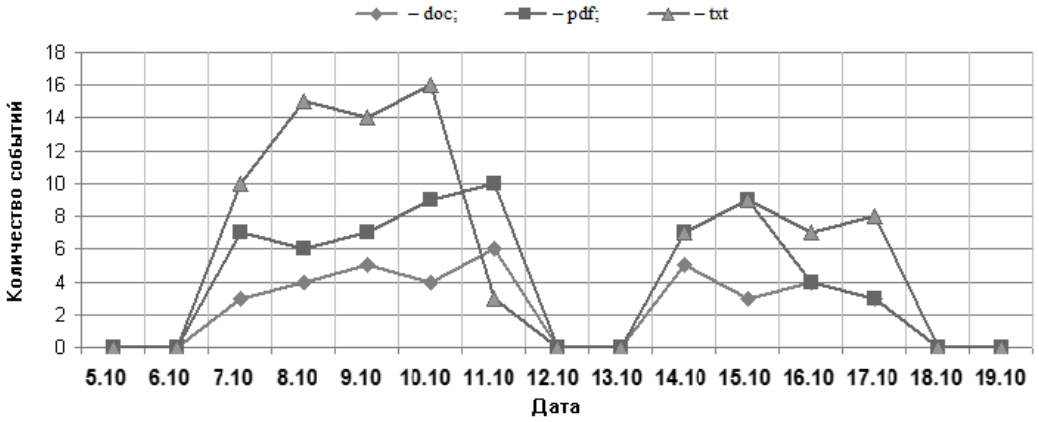


Рисунок 2 – Распределение количества событий создания файлов с различными расширениями (испытуемый 2)



Рисунок 3 – Распределение количества событий открытия файлов с расширением xls (два испытуемых)

Другие обозначенные признаки (временные характеристики нажатия клавиш и особенности работы субъектов с мышью) имеют распределение, близкое к нормальному, как уже

указывалось в рамках предыдущих работ [3]. Для испытуемых, совершивших нарушения в процессе прохождения теста, были созданы эталоны двух состояний – до совершения нарушений и после (во время). Для этого были вычислены оценки математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений значений признаков по аналогии с тем, как это описано в источнике [3]. Учитывались только те признаки, количество реализаций значений которых превышало 25 для всех испытуемых в каждом состоянии. Это обусловлено тем, что выборка из 26 или более реализаций значений признака, сформированного клавиатурным почерком субъекта, является репрезентативной [4]. Аналогичные заключения были сделаны и относительно признаков, базирующихся на особенностях работы с мышью. Общее количество признаков, которое было использовано при создании эталона, составило 20. Это особенности использования мыши, время удержания некоторых клавиш (12 – «а», «в», «е», «и», «м», «н», «о», «п», «р», «с», «т», «пробел») и паузы между нажатием некоторых клавиш («т» и «о», «н» и «а», «с» и «т», «н» и «е»).

Для определения того, изменяется ли идентификационный потенциал клавиатурного почерка субъекта, и особенностей его работы с мышью при совершении субъектом нарушений прав доступа к информации был проведен вычислительный эксперимент. В ходе эксперимента на основе созданных эталонов при помощи метода Монте-Карло были сгенерированы по 1000 значений каждого из 20 выбранных признаков для обоих состояний каждого из эталонов 12 субъектов аналогично тому, как это было реализовано в [5] (в соответствии с параметрами распределения этих признаков). Таким образом, было сгенерировано по 1000 реализаций биометрических данных для каждого состояния каждого из 12 испытуемых (всего 24000 реализаций). Созданные реализации были использованы для проведения серии опытов по имитации прохождения испытуемыми процедуры идентификации до и после (во время) совершения нарушений установленного режима доступа к информации. В отличие от [3] на данном этапе исследований решено использовать классический вариант стратегии Байеса (без модификаций) в качестве алгоритма принятия решений, так как данный алгоритм показал наилучшие результаты при проведении вычислительных экспериментов по имитации систем распознавания образов в пространстве малоинформативных признаков [5]. Стратегия Байеса заключается в вычислении интегральных апостериорных вероятностей гипотез за несколько шагов, в зависимости от количества признаков при помощи формулы гипотез Байеса (1). Каждая гипотеза ассоциируется с эталоном определенного испытуемого в состоянии до совершения нарушений (т. е. каждая гипотеза состоит в том, что предъявляемые биометрические данные при идентификации принадлежат определенному испытуемому). На каждом шаге за априорную вероятность принимается апостериорная вероятность, вычисленная на предыдущем шаге. На первом шаге все гипотезы считаются равновероятными, т. е. $P_0(H_i|A) = 1/n$, где n – количество гипотез (по аналогии с [3]).

$$P(H_i|A_j) = \frac{P_{j-1}(H_i|A)P(A_j|H_i)}{\sum_{i=1}^{n} P_{j-1}(H_i|A)P(A_j|H_i)}, \quad (1)$$

где $P(A_j|H_i)$ – условная вероятность гипотезы H_i о том, что предъявленные данные принадлежат эталону i-го испытуемого, равная плотности вероятности значения j-го признака ($j = 1…20$) A_j; $P_{j-1}(H_i|A)$ – апостериорная вероятность i-й гипотезы на j–1-м шаге при поступлении значения j-го признака.

Таким образом, проведенный эксперимент состоял из следующих этапов.

1. Генерация реализаций биометрических данных при помощи имеющихся эталонных распределений методом Монте-Карло. От каждого эталона субъекта было получено по 1000 сгенерированных векторов значений признаков (далее – реализаций) в каждом состоянии. Общее количество реализаций для каждого состояния составило 12000.

2. Проведение серии из 12000 опытов по распознаванию субъектов в состоянии до совершения нарушений при помощи стратегии Байеса. В качестве эталонов использовались

распределения значений признаков, полученные в состоянии до совершения нарушений и реализации в этом же состоянии. За верную гипотезу на каждом шаге принимается та, апостериорная вероятность которой является максимальной на данном шаге. В каждом опыте при помощи стратегии Байеса вычисляется совокупность из 20 апостериорных вероятностей (для каждого шага стратегии Байеса) каждой из гипотез для определенной сгенерированной реализации.

3. Проведение серии из 12000 опытов по распознаванию субъектов в состоянии после (во время) совершения нарушений при помощи стратегии Байеса. В качестве эталонов использовались распределения значений признаков, полученные в состоянии *до совершения нарушений*, но *реализации в состоянии после (во время) совершения нарушений*. За верную гипотезу на каждом шаге принимается та, апостериорная вероятность которой является максимальной на данном шаге. В каждом опыте при помощи стратегии Байеса вычисляется совокупность из 20 апостериорных вероятностей (для каждого шага стратегии Байеса) каждой из гипотез для определенной сгенерированной реализации.

4. Подсчитывается вероятность ошибок идентификации субъекта в каждом состоянии на каждом шаге (за исключением первого, т. е. для любого количества использованных для идентификации признаков от 2 до 20) как соотношение числа ошибочных решений к общему количеству опытов в определенном состоянии.

Опыты проводились с использованием эталонов и реализаций 3, 6, 9 и 12 субъектов (т. е. количество идентифицируемых субъектов в каждом состоянии изменялось с шагом 3). Результаты эксперимента показаны на рисунках 4 – 7.

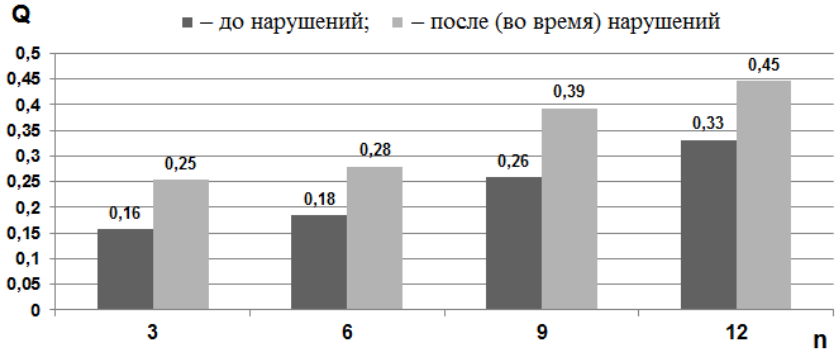


Рисунок 4 – Вероятность ошибки *Q* идентификации субъектов по клавиатурному почерку на последнем шаге стратегии Байеса в различных состояниях при различном количестве эталонов *n*

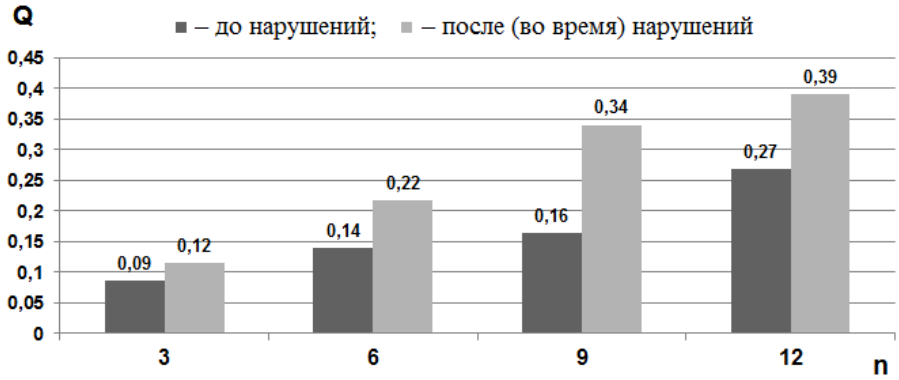


Рисунок 5 – Вероятность ошибки *Q* идентификации субъектов по клавиатурному почерку и особенностям работы с мышью на последнем шаге стратегии Байеса в различных состояниях при различном количестве эталонов *n*

Прежде всего отметим, что за счет использования предложенных особенностей работы с мышью в качестве идентифицирующих признаков общее количество ошибочных решений удалось снизить в среднем на 9 % (по сравнению с использованием только клавиатурного

почерка). По результатам эксперимента количество ошибок идентификации субъектов в состоянии после (во время) совершения нарушений режима доступа к информации увеличилось в среднем на 26 % (см. рисунки 6 и 7). Таким образом, информативность клавиатурного почерка и особенностей работы с мышью для задач непрерывной идентификации субъекта снижается при реализации им противоправных действий по отношению к информационным ресурсам. Обратимся к графикам плотностей вероятности значений используемых признаков (рисунок 8), которые были построены по полученным в рамках проведенных экспериментов данным о клавиатурном почерке пользователей. При выполнении заданий в условиях конкуренции (при имеющейся мотивации выполнить задание первым) степень неопределенности значений признаков клавиатурного почерка возрастает. При совершении нарушений режима доступа неопределенность значительно возрастает у большинства испытуемых (у 9 из 12). Вероятно, это вызвано волнением. Чем больше субъект взволнован, тем более нестабилен клавиатурный почерк субъекта. Логично, что при совершении правонарушений волнение значительно усиливается, что отражается на динамических биометрических признаках субъекта. Однако это характерно не для всех испытуемых. Аналогичные заключения сделаны относительно особенностей работы испытуемых с мышью.

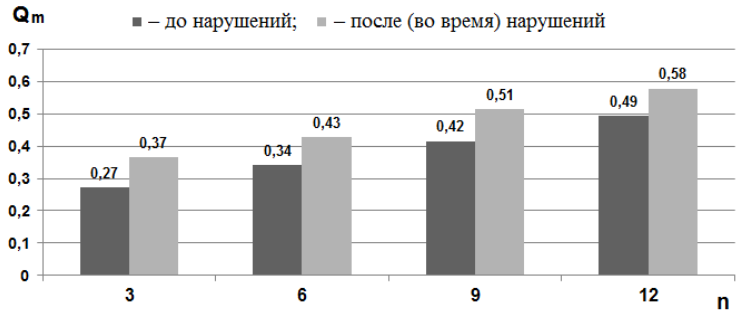


Рисунок 6 – Среднее значение вероятности ошибки Q_m идентификации субъектов по клавиатурному почерку в различных состояниях при различном количестве эталонов n

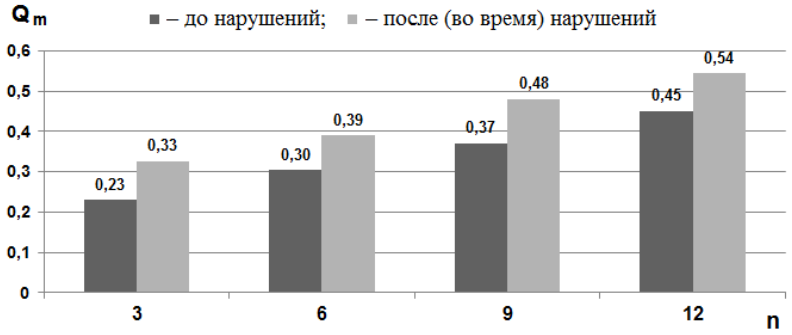


Рисунок 7 – Среднее значение вероятности ошибки Q_m идентификации субъектов по клавиатурному почерку и особенностям работы с мышью в различных состояниях при различном количестве эталонов n

С учетом приведенной выше информации были сделаны следующие выводы:

1. Чем выше дисперсия фактических показателей количества произошедших событий безопасности (операции с файлами, запуск программ, использование «горячих» клавиш) в определенное время суток от их среднего числа, полученного в результате многократных наблюдений в это же время суток, тем выше степень неопределенности действий пользователя. Спонтанное существенное изменение данной дисперсии может свидетельствовать о реализации атаки или изменении характера выполняемых задач.

2. При реализации субъектом нарушений режима доступа к информации увеличивается нестабильность его клавиатурного почерка и особенностей работы с мышью. Увеличение дисперсии регистрируемых значений признаков за длительный промежуток времени (порядка 5 – 10 мин) может указывать на реализацию атаки, но это может свидетельствовать и о том, что за компьютером находится другой человек.

3. Данных, получаемых только от стандартных устройств, для реализации процедуры определения нелояльности поведения недостаточно. Целесообразно учитывать психоэмоциональное состояние субъекта, которое можно оценить при помощи дополнительного оборудования [6]. Следовательно, гипотеза, обозначенная в начале статьи, отклоняется.

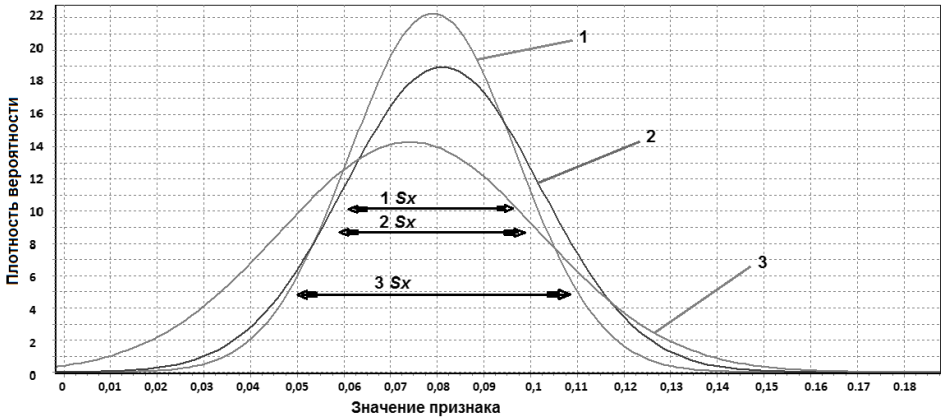


Рисунок 8 – Изменение нестабильности (среднеквадратичного отклонения *Sx*) временных задержек удержания клавиши «а» в процессе ввода текста на клавиатуре одного из испытуемых в трех состояниях:
1 – при решении задач без возможности совершения нарушений (построено исходя из данных предыдущего эксперимента из работы [5]), 2 – при решении задач в условиях конкуренции до совершения нарушений,
3 – при решении задач в условиях конкуренции после (во время) совершения нарушений

Таким образом, требуется изменить подход к проведению дальнейших исследований: необходимо комплексировать полученные в рамках данного исследования наработки (анализ клавиатурного почерка, особенностей работы с мышью и событий безопасности) с методом определения психоэмоционального (или психофизиологического) состояния. Для разработки методики определения нелояльности пользователя необходимо провести длительные эксперименты по скрытому мониторингу субъектов компьютерных систем в реальных условиях с использованием не только стандартного периферийного оборудования, но и видеокамеры и тепловизора. При анализе полученных данных следует учитывать характер решаемых пользователем задач и использовать методику дистанционного определения психофизиологического состояния субъекта [7].

Список литературы

1. Сулавко, А. Е. Технологии защиты от внутренних угроз информационной безопасности [Текст] / А. Е. Сулавко // Вестник Сибирской гос. автомобильно-дорожной акад. / Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск. – 2011. – № 1 (19). – С. 45 – 51.

2. Эффект Сноудена. Методы и технологии противодействия XVmatic // Специальная техника. – 2013. – № 5. – С. 62, 63.

3. Разграничение доступа к информации на основе скрытого мониторинга действий пользователей в информационных системах: скрытая идентификация [Текст] / А. В. Еременко, Е. А. Левитская и др. // Вестник Сибирской гос. автомобильно-дорожной акад. / Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск. – 2014. – № 6 (40). – С. 92 – 102.

4. Сулавко, А. Е. Метод сжатия собственных областей классов образов в пространстве малоинформативных признаков [Текст] / А. Е. Сулавко, А. В. Еременко // Искусственный интеллект и принятие решений / Ин-т системного анализа Российской акад. наук. – М. – 2014. – № 2. – С. 95 – 102.

5. Епифанцев, Б. Н. Сравнение алгоритмов комплексирования признаков в задачах распознавания образов [Текст] / Б. Н. Епифанцев, П. С. Ложников, А. Е. Сулавко // Вопросы защиты информации / Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации – федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности. – М. – 2012. – № 1. – С. 60 – 66.

6. Ковальчук, А. С. Дистанционная идентификация психофизиологического состояния человека [Текст] / А. С. Ковальчук // Академический журнал Западной Сибири / Ин-т геологии и геохимии. Уральское отделение Российской акад. наук. – Екатеринбург. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 74, 75.

7. Епифанцев, Б. Н. Скрытая идентификация водителя и его психофизиологического состояния в процессе управления транспортным средством по вариабельности сердечного ритма [Текст] / Б. Н. Епифанцев, А. С. Ковальчук // Биотехносфера. – СПб: Политехника, 2014. – № 5 (35). – С. 54 – 59.

References

1. Sulavko A. E. Technologies of protection against internal threats to information security [Tehnologii zashhity ot vnutrennih ugroz informacionnoj bezopasnosti]. *Vestnik Siberian State Automobile and Highway Academy – SibADI*. – Omsk, 2011, no. 1 (19). – pp. 45 – 51.

2. Effect Snowden. Methods and technologies to counter XVmatic [effect Snoudena. Metodi i tehnologii protivodeistviyz XVmatic]. *Special equipment*, 2013, no. 5, pp. 62 – 63.

3. Eremenko A. V., Levitskaya E. A., Sulavko A. E., Samotuga A. E. Concurrent access to information on the basis of a hidden monitoring user activity in information systems: Identification of latent [Razgranicheniye dostupa k informatsii na osnove skrytogo monitoringa deystviy pol'zovateley v informatsionnykh sistemakh: skrytaya identifikatsiya]. *Bulletin of Siberian State Automobile and Highway Academy – SibADI*. – Omsk, 2014, no. 6, pp. 92 – 102.

4. Sulavko A. E., Eremenko A. V. Compression Method own areas of classes in the space of images uninformative signs [Metod sjatiya sobstvennih oblastey klassov obrazov v prostranstve maloinformativnih priznakov]. *Artificial intelligence and decision-making*. – Moscow, 2014, no. 2, pp. 95 – 102.

5. Epifantsev B. N., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E. Comparison of algorithms for aggregation features in pattern recognition problems [Sravnenie algoritmov komplecsirovaniya priznakov v zadachah raspoznaviniya obrazov]. *Questions of information security – FSUE «VIMI»*. – Moscow, 2012, no. 1, pp. 60 – 66.

6. Kovalchuk A. S. Remote identification of psychophysiological state [Distancionnaya identifikaciya pcihofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka]. *Academic Journal of Western Siberia*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 74 – 75.

7. Epifantsev B. N., Kovalchuk A. S. Hidden identification of the driver and his psychophysiological state during driving on heart rate variability [Skritaya identifakaciaya voditelya i ego pcihofiziologicheskogo sostoyaniya v processe upravleniya transpirtnim sredstvom po variabelnosti serdechnogo ritma]. *Biotechnosphere*, 2014, no. 5 (35), pp. 54 – 59.

УДК 004.083

В. Г. Шахов, А. В. Морозов, А. П. Тиунов, А. Н. Громов

ИГРОВЫЕ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В статье изложены принципы количественного оценивания информационной безопасности с позиций теории игр. Введены определения игровой матрицы и ее количественной интерпретации. Представлены практически реализуемые методики анализа, планирования и проектирования информационной безопасности на основе предложенных моделей.

Автором работы [1] предлагались модели описания информационных систем с использованием теории графов и матричного представления графов. В предлагаемой статье описаны последующие исследования применительно к информационной безопасности.

Современные информационные системы представляют собой сложные иерархические системы. Они обеспечивают функционирование всех составляющих взаимодействия государств, организаций, предприятий и физических лиц. Фактически они являются надгосударственной структурой, средством взаимодействия глобального уровня (Интернет и поддерживающие его технические и программные средства). В этой связи мировое сообщество заинтересовано в устойчивости и безопасности этих систем.

Глобальную информационную сеть можно рассматривать на различных уровнях и в зависимости от поставленных задач. Рассмотрим некоторые из таких проблем.

1. *Надежность и живучесть*. Предполагается, что при нарушениях инфраструктуры системы способны выполнять свои функции, хотя и с потерей качества или с задержками (потеря части информации). Задачи решаются несколькими способами:

а) дублирование оборудования и каналов связи. Особенно эффективно действует на верхних уровнях с большими потоками информации. Например, магистральные линии связи дублируются на разных уровнях;

б) наиболее эффективные в настоящее время оптоволоконные линии связи дублируются дополнительными, включая прокладку кабелей по тем же трассам. Как вариант, прокладывают кабели по другим местам (это дороже);

в) используется избыточность на локальном уровне. Например, все АТС связаны между собой по технологии «каждый с каждым». С точки зрения теории графов используется полный граф, в котором потеря связи по одному из каналов не влияет на качество взаимодействия. Это дорого, поэтому используются промежуточные варианты. Это и является предметом прикладной науки;

г) используются технологии перехода на другие типы каналов связи. Кроме магистральных линий связи применяются радиоканальные системы, причем они могут быть по крайней мере трех типов, в зависимости от диапазона использования: ближнего действия (УКВ-диапазон), глобального наземного действия (КВ-связь), космическая связь. В настоящее время наиболее прогрессивными являются технологии *Wi-Fi* и *Wi-Max*. Они позволяют дополнять имеющиеся пробелы в связи существующими линиями связи. Вместе с тем появляются проблемы разделения каналов как по частоте, так и по времени, а также районирования, дублирования каналов.

2. *Обеспечение качества связи*. Понятие качества связи определяется международными стандартами QoS [2] и включает в себя множество разноплановых характеристик: разборчивость и узнаваемость клиентов связи, уровень помехоустойчивости, задержки взаимодействия, потери информации. Повышенное качество связи возможно с использованием мероприятий, приведенных в предыдущем пункте. Кроме того, существующие технологии цифровых взаимодействий основаны на пакетной передаче информации сетевого уровня. Главными технологиями цифровых взаимодействий являются протоколы IP, причем в настоящее время используются два протокола, IPv4 и IPv6, ориентированные на 32- и 64-разрядные микропроцессоры. К сожалению, в России не предусмотрен переход на новые технологии в рамках государства вследствие недостаточного финансирования на государственном уровне.

Те не менее существующие протоколы взаимодействия ориентированы в основном на один критерий – увеличение потоков информации при существующих ограничениях на существующие каналы связи и их пропускную способность. Протоколы уровней IP и TSP рассчитаны в основном на повторную передачу пакетов при их неполучении приемником или промежуточным коммутационным пунктом, что загружает коммутационное оборудование и приводит к дополнительным задержкам связи. Корректирующие коды используются только на обнаружение, но не на исправление ошибок, причем в качестве корректирующего кода использован только один, принятый за стандартный.

Разгрузка каналов связи использованием других корректирующих кодов и методов декодирования также может быть предметом исследования. Кроме того, появляются задачи синхронизации пакетов при передаче на высокоскоростные каналы уровней SDH и ATM.

3. *Оптимизация трафиков*. Задачу можно назвать *информационной логистикой*. Сформулируем ее следующим образом. Существует сеть клиентов, связанных между собой каналами связи и взаимодействующих между собой в реальном времени. Основные ресурсы – запасы информации в пунктах сети, способы взаимодействия по каналам связи – определяются топологией сети и потоками информации по этим каналам. Необходимо оптимизировать сеть по одному из существующих критериев взаимодействия и при наличии ограничений.

Логистические задачи такого уровня достаточно новы и перспективны. Возможные ограничения – допустимые потоки информации по каналам связи, уровни помех и потерь информации, время задержки, стоимость взаимодействия. Критерии оптимизации – минимум затрат, минимум времени задержки или потерь информации, максимум потоков информации, минимум времени обслуживания и т. д.

Логистические задачи часто сводятся к топологическим (графовым), когда пространство взаимодействия представляется в виде графа или соответствующих ему матриц. Предложенные методы решения и оптимизации таких задач [4, 7] допускают расширение и модернизацию.

4. *Информационная безопасность* – это емкое и многогранное направление, включающее в себя конфиденциальность взаимодействий, обеспечение целостности и отсутствие информационных нарушений. Несмотря на множество технологий и способов защиты информации в этой области существует множество проблем. Часто они связаны с политическими вопросами, которые затрагивают государственные интересы или вопросы экономической и нравственной этики. Существует конкуренция на различных уровнях. Бороться за информационную безопасность в таких условиях достаточно проблематично.

Несмотря на многообразие технологий и топологий информационных систем и сетей возможно решение множества частных задач, решающих изложенные выше проблемы.

Авторами предложена и доведена до практического применения методика анализа и компьютерного моделирования, основанная на комбинированном применении аппарата теории игр и теории графов. Для конкретизации методики разделим структуру информационных систем на три уровня: глобальный, корпоративный и местный.

Информационные системы и сети местного уровня представляют собой локальные информационные системы, оказывающие информационные услуги частным клиентам. Это прежде всего домашние компьютерные сети, имеющие территориальную ориентацию. Они относятся к классу услуг под названием «мультисервис» и включают в себя цифровые телефонию, телевидение и Интернет. Программное обеспечение, оборудование и способы подключения разработаны достаточно детально и успешно функционируют.

Как правило, домовые сети имеют одну точку сопряжения с выходом на местного провайдера через оптоволокно или радиоканал. Местные пользователи подключаются в основном по схеме «звезда», т. е. не влияют друг на друга.

Более сложную топологию имеют информационные сети предприятий, тоже входящие в сети местного уровня. Они имеют достаточно большое количество внутренних взаимодействий (службы, отделы, подразделения), и топология их связей может иметь достаточно сложный характер, как и типы каналов связи.

Корпоративные информационные сети и системы имеют развитую инфраструктуру и топологию. Их главный приоритет – надежность, поэтому топология таких систем приближается к полному графу (соединения типа «каждый с каждым»). Вторая по важности задача – наполняемость сети взаимодействиями, так как клиенты расплачиваются за трафик. На этом уровне наиболее плодотворны задачи логистики, поскольку здесь приоритет имеет тарификация. Оптимизация информационных потоков по критерию максимума прибыли является первоочередной задачей.

Наконец, на верхнем, глобальном уровне также имеет место задача информационной логистики. Проблема живучести приоритетна, и здесь она решается достаточно плодотворно и профессионально.

Приведем некоторые количественные оценки информационных взаимодействий. Прежде всего зададимся величиной *суммарной информационной емкости* $W_{\text{сум}}$ – общего объема памяти:

$$W_{\text{сум}} = \sum_{I=1}^{N} W_I, \tag{1}$$

где W_I – емкость I-го элемента памяти; N – количество рассматриваемых объектов взаимодействия. Объемом памяти самих каналов связи можно пренебречь.

Объем фактического информационного ресурса $U_{\text{сум}}$ – это фактический объем информации, находящейся в системе, хранящейся в памяти и передаваемей:

$$U_{\text{сум}} = \sum_{I=1}^{N} U_I. \tag{2}$$

Понятно, что $U_{\text{сум}} < W_{\text{сум}}$, причем можно ввести *коэффициент заполнения* $\alpha = U_{\text{сум}} / W_{\text{сум}}$, лежащий в пределах от 0 до 1.

Суммарный трафик $L_{\text{сум}}$ – это общий объем передаваемой информации. Естественно, это функция времени:

$$L_{\text{сум}}(t) = \sum_{I=1}^{N} L_I. \tag{3}$$

Другие количественные оценки могут быть распространены для решения конкретных сетевых задач. Для их конкретизации рассмотрим простейшую топологию информационной системы, приведенную в виде графа на рисунке 1. Здесь вершины соответствуют конкретным объектам сети, ребра представляют физические взаимодействия (например, физические линии связи), коэффициенты a_{IJ} (весовые коэффициенты) определяют количественные оценки взаимодействий.

Приведенный граф может быть применен для любого сегмента информационной трехуровневой системы, описанной в источнике [5] и может быть распространен на любую типичную топологию (звезда, дерево, линия, их комбинации).

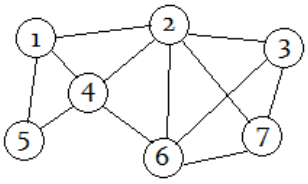


Рисунок 1 – Граф взаимодействий информационной сети

Плоский граф взаимодействий описывает физические взаимодействия информационной системы в рамках общепринятой модели семейства стандартов OSI / ISO и родственных им международных рекомендаций. На этой модели можно вводить количественные оценки в зависимости от класса решаемых задач.

Любой плоский граф может быть представлен соответствующей матрицей. Если граф *невзвешенный* [4], то его ребра определяют лишь отношения смежности (если связь между вершинами есть, то $a_{IJ} = 1$, если нет, $a_{IJ} = 0$).

Взвешенный граф имеет возможность варьировать коэффициентами a_{IJ}, причем в зависимости от типа решаемой задачи есть возможность конкретно численно описывать коэффициенты a_{IJ}.

Стратегии защиты информации принципиально зависят от времени суток, дня недели, месяца и т. д. Приведенные задачи могут быть *динамическими,* т. е. могут включать в себя зависимость от этих величин. В таких случаях перечисленные выше величины являются функциями времени.

Приведем некоторые из типичных задач информационных взаимодействий.

1. Задача оптимизации загрузки сети по критерию максимума трафика. Здесь коэффициенты $a_{IJ}(t)$ в зависимости от типа решаемой задачи могут представлять собой

– максимально возможную загрузку данного сегмента сети, например, в Мбит/с;

– стоимость соединения во времени (тарифы услуг зависят и от времени суток, и от дня недели, и от выбранного провайдера);

– вероятности нарушения информации, включая ее потерю или другие ущербы;

– риски клиентов сети в любом варианте (условные вероятности, стоимость, относительные величины).

Сами оценки в прямом измерении могут быть неименованными (кроме зависимости от времени), важно их соотношение с другими вариантами переходов на графе.

2. Задача оптимизации сети по критерию максимальной рентабельности. Коэффициенты a_{IJ}(t) могут иметь те же подсистемы, что и в предыдущем случае. Такие задачи обычно ставятся на двух верхних уровнях.

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11}(t) & \alpha_{12}(t) \ldots\ldots\ldots\ldots & \alpha_{1n}(t) \\ \alpha_{21}(t) & \alpha_{22}(t) \ldots\ldots\ldots\ldots & \alpha_{2n}(t) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & & \\ \alpha_{n1}(t) & \alpha_{n2}(t) \ldots\ldots\ldots\ldots & \alpha_{nn}(t) \end{vmatrix}$$

Рисунок 2 – Матрица информационных взаимодействий

Рассмотрим более подробно модель описания информационной сети в топологическом пространстве, т. е. с учетом информационных взаимодействий клиентов. Возможны несколько уровней взаимодействия. Первый – непосредственное взаимодействие: после подключения клиент I непосредственно подключается к клиенту *J*. В таком варианте коэффициенты a_{IJ}(t) представляют собой стоимость трафика и могут быть представлены в виде обычной двумерной матрицы, в которой они могут иметь, например, одну из перечисленных выше оценок. Вид матрицы представлен на рисунке 2.

Не обращаясь к деталям получения коэффициентов $a_{IJ}(t)$, отметим возможные пути решения оптимизации трафика, для чего привлечем некоторые определения из теории взвешенных графов [3].

Вес дуги $C_{IJ}(t)$ – количественная оценка перехода по графу из вершины *I* в вершину *J*. В отличие от количественной оценки $a_{IJ}(t)$ может включать в себя множители R_{IJ}, которые можно считать *весовыми коэффициентами,* в результате чего матрица, представленная на рисунке 2, приобретает аналогичный вид, но с коэффициентами $C_{IJ}(t)$:

$$C_{IJ}(t) = R_{IJ} \cdot a_{IJ}(t). \quad (4)$$

Отметим, что если между вершинами дуга отсутствует, то коэффициент $C_{IJ}(t) = \infty$.

Маршрут на графе – связная последовательность вершин и соединяющих их ребер. Маршрут всегда конечен, т. е. начинается и заканчивается за конечное число шагов (дуг). В этой связи появляется оценка «*вес маршрута*»:

$$S_Q(t) = \sum_{I=1}^{Q} C_{IJ}(t), \quad (5)$$

где *Q* – *длина маршрута,* т. е. количество входящих в него дуг.

Вес вершины графа $M_I(t)$ – сумма весов дуг, инцидентных данной вершине:

$$M_I(t) = \sum_{I=1}^{F} C_{IJ}(t), \quad (6)$$

где *F* – количество инцидентных дуг.

Минимальный маршрут $S_{QIJ\,\min}(t)$ – маршрут, имеющий минимальный вес. Предполагается, что между вершинами I и J существует несколько маршрутов с различными весами $S_Q(t)$, причем минимальным считается маршрут с наименьшим весом:

$$S_{QIJ\,\min}(t) = \min_g \cdot S_{QIJ}(t), \tag{7}$$

где g – текущий номер маршрута.

Задачи такого типа решаются в теории игр и носят название *минимаксных* [5, 6].

Авторами выполнен достаточно большой объем работ, связанных с количественным описанием информационной безопасности и оперативного мониторинга реальных компьютерных сетей, в том числе с использованием описанного математического аппарата. Полученные результаты позволили упростить политику управления информационной безопасностью.

Список литературы

1. Шахов, В. Г. Введение в информационные системы и телекоммуникации [Текст] / В. Г. Шахов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2001. – 87 с.

2. Петренко, С. А. Управление информационными рисками. Экономически оправданная целесообразность [Текст] / С. А. Петренко, С. В. Симонов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 384 с.

3. Кендалл, М. Статистические выводы и связи [Текст] / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1973. – 900 с.

4. Шаньгин, В. Ф. Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства [Текст] / В. Ф. Шаньгин. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 544 с.

5. Майстренко, В. А. Безопасность информационных систем и технологий [Текст] / В. А. Майстренко, В. Г. Шахов / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2006. – 232 с.

6. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 446 с.

7. Бендат, Д. С. Измерение и анализ случайных процессов [Текст] / Д. С. Бендат, А. Дж. Пирсол. – М.: Мир, 1971. – 390 с.

References

1. Shakhov V. G. *Vvedenie v informatsionnye sistemy i telekommunikatsii* (Introduction to information systems and telecommunications). Omsk: OSTU, 2001, 87 p.

2. Petrenko S. A., Simonov S. V. *Upravlenie informatsionnymi riskami. Ekonomicheski opravdannaia tselesoobraznost'* (Information Risk Management. Economically justified expediency). Moscow: DMK Press, 2004, 384 p.

3. Kendall M., St'iuart A. *Statisticheskie vyvody i sviazi* (Statistical inference and communication). Moscow: Nauka, 1973, 900 p.

4. Shan'gin V. F. *Zashchita komp'iuternoi informatsii. Effektivnye metody i sredstva* (Protection of computer information. Effective methods and tools). Moscow: DMK Press, 2010, 544 p.

5. Maistrenko V. A., Shakhov V. G. *Bezopasnost' informatsionnykh sistem i tekhnologii* (Security Information Systems and Technology). Omsk: OmSTU, 2006, 232 p.

6. Zade L. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiiu priblizhennykh reshenii* (The concept of linguistic variable and its application to the adoption of the approximate solutions). Moscow: Mir, 1976, 446 p.

7. Bendat D. S., Pirsol A. Dzh. *Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov* (Measurement and analysis of stochastic processes). Moscow: Mir, 1971, 390 p.

УДК 691.795.2

В. А. Аксенов, А. В. Матафонов, А. С. Ильиных

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЛЬСОВ

Рассмотрено влияние надежности технологического процесса шлифования рельсов при обеспечении параметров качества обработанной поверхности. Приведены результаты анализа взаимосвязи параметров качества шлифования рельсов с условиями их обработки. Рассмотрены факторы, влияющие на надежность технологической системы. Приведена модель определения надежности технологического процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. Представлен алгоритм расчета параметров надежности технологической системы рельсошлифования. Рассмотрено формирование показателей качества в процессе осуществления технологического процесса шлифования рельсов.

Требуемый уровень качества поверхности катания рельсов, с минимальными материальными и временными затратами, обеспечивает технологический процесс шлифования рельсов. Выходные параметры технологического процесса шлифования определяются его компонентами: структурой и параметрами технологического процесса, методами обработки и контроля. Установлено, что показатели качества рельсов зависят от технологического процесса шлифования. Развитие и совершенствование технологического процесса шлифования рельсов, повышение его надежности и изменение его параметров и структуры позволит получать рельсы с более высоким уровнем качества. [1]

В настоящее время зависимость между эксплуатационной стойкостью рельсов и технологическим процессом их шлифования не определена в полной мере. Практические разработки и исследования, направленные на изучение роли технологических процессов шлифования, также указывают на отсутствие определенного круга вопросов, которые необходимо решить технологии [1].

Известно, что методы и режимы шлифования рельсов, а также последовательность технологических воздействий оказывают влияние на эксплуатационные свойства рельсов. Установление четкой взаимосвязи между показателями качества рельсов и технологическими параметрами шлифования позволит получать поверхность катания рельсов, в наибольшей степени соответствующую определенным условиям их эксплуатации [2].

Для установления четкой взаимосвязи между надежностью технологического процесса шлифования рельсов и качеством рельсов необходимо провести анализ причин отказов, вызванных несовершенством технологического процесса шлифования рельсов. К отказам, вызванным несовершенством технологии, относят необоснованность технических условий, недостаточную надежность технологического процесса, остаточные и побочные явления.

Необоснованность технических условий на параметры качества поверхности рельсов и параметры техпроцесса возникает потому, что не всегда учитывают изменение свойств рельсов в процессе их эксплуатации, структуру операций и их последовательность. В результате качество поверхности рельсов имеет разный уровень на различных участках поверхности катания.

Недостаточная надежность технологического процесса шлифования рельсов является следствием сложности системы, включающей в себя большое количество взаимосвязей, характеризуемых множеством выходных параметров. Для получения рельсов с заданным уровнем качества поверхности необходимо повышать уровень надежности самой системы за счет повышения запаса надежности техпроцесса, эффективности контрольных процессов, надежности оборудования.

Множество различных взаимосвязей в сложных технических системах вызывает определенные трудности при обеспечении высокой надежности технологии рельсошлифования. Изменение начальных параметров технологического процесса во времени носит стохастический характер. По этой причине теория надежности технологических процессов использует

вероятностные методы оценки изменения процессов с выявлением детерминированных закономерностей. Для изучения физических закономерностей используются функциональные зависимости с математическими методами теории вероятности. Облегчение повышения надежности технологического процесса шлифования рельсов возможно за счет изменения структуры, параметров и элементов технологической системы.

Качественные и количественные показатели технологического процесса неразрывно взаимосвязаны. Повышение качества поверхности рельсов может привести к снижению производительности технологического процесса шлифования рельсов. При проектировании технологического процесса шлифования рельсов необходимо учитывать взаимосвязь этих показателей для обеспечения необходимой надежности.

Оценка надежности технологического процесса шлифования рельсов производится по показателям оценки надежности, применимым к любой системе. Безотказность технологического процесса есть вероятность сохранения технологических параметров в пределах допуска в заданный промежуток времени. Отказ технологической системы может наступить внезапно вследствие ошибки человека, наличия дефекта в инструменте или рельсах и т. п. Вследствие износа оборудования, инструмента, контрольных приборов возможен постепенный отказ технологической системы.

Потеря работоспособности технической системы с течением времени связана как с внутренними, так и с внешними воздействиями на систему. Для проведения анализа процесса потери работоспособности системы целесообразно использовать математическую модель надежности. Также необходимо разработать процесс формирования выходных параметров качества и производительности технической системы.

Управление процессом формирования показателей надежности путем воздействия на отдельные этапы их формирования с постоянным контролем хода процесса позволит обеспечить необходимый уровень надежности данных показателей (рисунок 1).

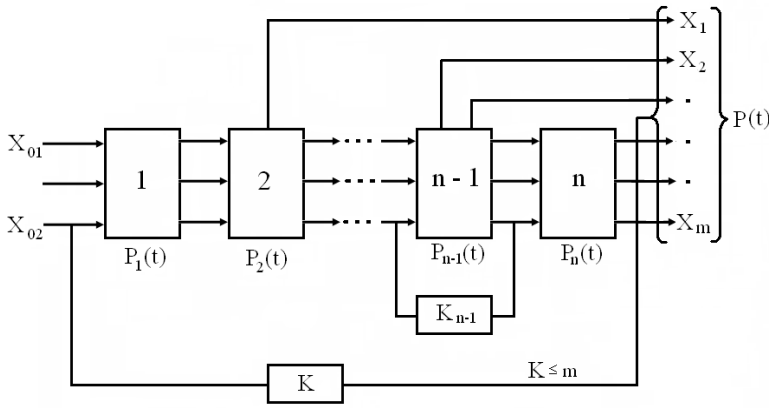


Рисунок 1 – Схема формирования показателей надежности технологического процесса

Безотказность технологического процесса есть вероятность $P(t)$ выхода параметра за установленные пределы в установленный период времени T. При этом технологический процесс, включающий в себя n операций, должен обеспечивать нахождение m параметров X_1, $X_2,\ldots, X_m$ в допустимых пределах.

Шлифование рельсов производится поэтапно. Для каждого отдельно взятого этапа шлифования назначают свои выходные параметры. Таким образом, надежность технологической системы обеспечивается за счет обеспечения надежности подсистем, формирования структуры системы, определения последовательности выполнения операций и их взаимосвязи. Как следствие, каждая операция имеет свою вероятность $P_i(t)$. Вероятность безотказного осуществления ТП при этом не равна произведению вероятностей $P_i(t)$ каждой из операций. Это обусловлено тем, что в результате отказа подсистемы образуется брак. По причине технологической наследственности выходные значения параметров предыдущих операций влияют

на параметры последующих операций, что в результате приводит к изменению значений параметров качества поверхности рельсов после их шлифования.

Показатели надежности технологического процесса шлифования рельсов должны обеспечивать определенную наработку рельсов с установленными показателями качества и необходимую производительность. Если какой-либо параметр, влияющий на качество поверхности рельсов или на производительность технологического процесса шлифования рельсов, выходит за установленные пределы, наступает параметрический отказ. По этой причине оценка поведения технологической системы осуществляется параметрической надежностью системы.

Технологический процесс шлифования рельсов осуществляется с помощью сложной, динамической технологической системы, имеющей свою определенную структуру. Данная система включает в себя подсистемы, отвечающие за выполнение отдельных операций. Каждая подсистема имеет свои входные и выходные технологические параметры. Входные технологические параметры включают в себя точность изготовления, режимы резания, точность настройки, период стойкости инструментов и др. Выходные технологические параметры включают в себя показатели качества рельсов и производительность технологического процесса шлифования рельсов.

Естественный износ основных элементов подсистемы, коррозия и ползучесть металлов, и другие подобные процессы, протекающие во время работы системы между ремонтами, называют медленными. Износ режущего инструмента, деформации, вызванные изменением температуры, относят к процессам средней скорости. Они приводят к монотонному изменению исходных параметров системы, вследствие чего появляется систематическая погрешность. Колебания сил резания и трения, а также вибрации элементов относят к быстропротекающим процессам.

Анализ характера взаимосвязи технологически обеспечиваемых и контролируемых параметров обработанной поверхности рельса с условиями обработки показывает, что геометрической точностью профилей рельсов в наилучшей степени можно управлять при помощи настройки конструктивных параметров рабочего оборудования, а также подбора ремонтных профилей рельсов в соответствии с их фактическим состоянием. Параметры качества обработанной поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя обеспечиваются соотношением режимных параметров (таблица 1). При этом влияние случайных факторов на формирование качества обрабатываемой поверхности приводит к различной степени надежности при его технологическом обеспечении.

Таблица 1 – Взаимосвязь параметров качества шлифования рельсов с условиями их обработки

Параметры шлифования рельсов	Параметры качества шлифования рельсов					
	точность поперечного профиля рельса	средняя высота волн продольного профиля рельса Wz, мм	шероховатость поверхности R_z, мкм	глубина наклепанного слоя h, мм	остаточные напряжения в поверхностном слое $\pm\sigma_{ост}$, МПа	наличие прижогов
1	2	3	4	5	6	7
Скорость рельсошлифовального поезда $v_п$, км/ч (продольная минутная подача $S_п$, м/мин)	0	0	+	+	+	–
Скорость резания $v_р$, м/с (частота вращения шлифовального круга $n_{кр}$, об/мин)	0	0	–	–	+	+
Усилие прижатия шлифовального круга к рельсу F_z, Н (токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I, А)	0	–	+	+	+	+
Угол наклона шлифовальной головки φ (ширина дорожки шлифования B, мм)	±	0	±	±	±	±

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Твердость участка обрабатываемой поверхности рельса, НВ	0	0	–	–	–	±
Жесткость технологической системы	–	–	+	0	0	0
Исходные геометрические параметры головки рельса, мм:						
поперечный профиль	+	0	0	0	0	0
продольный профиль	0	+	0	0	0	0

Примечание. Знак «+» указывает на прямую зависимость между параметрами обработки и параметрами качества обработанного рельса, «–» – на обратную зависимость.

В качестве показателя выбора метода обработки с учетом надежности параметра предлагается максимум вероятности P выполнения задания по одному из параметров качества поверхностного слоя Y в определенном интервале:

$$P\left\{Y \in \left(\overline{Y} + \delta\overline{Y};\ \overline{Y} - \delta\overline{Y}\right)\right\} = \max, \tag{1}$$

где $\overline{Y}$ – средняя величина регламентированного параметра качества поверхностного слоя, (например, шероховатость Rz); $\delta\overline{Y}$ – допустимая величина изменения регламентированного параметра.

Определение P при различных значениях Y и $\delta\overline{Y}$ осуществляется имитационным моделированием в виде степенных моделей:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + ... + \beta_i X_i + ... + \beta_k X_k;\ Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} ... X_i^{\beta_i} ... X_k^{\beta_k}, \tag{2}$$

где X_i – i-й фактор технологического метода; β_0, β_1,…, β_k – истинные значения коэффициента, являющегося случайной нормально распределенной величиной.

В основу построения имитационных моделей положен физико-статистический подход, концепция которого заключается в том, что структура модели технологической операции формируется на основе анализа причинно-следственных связей факторов механической обработки и внешней среды, а выходные параметры определяются статистическими методами. В качестве таких моделей могут служить раннее полученные зависимости, представленные в исследованиях В. А. Аксенова, В. А. Шаламова, А. С. Ильиных, В. Н. Фефелова и др. [3 – 5]:

$$R_Z = 840{,}95\frac{S^{0{,}888} t^{0{,}402}}{n^{0{,}433}} k; \tag{3}$$

$$R_Z = 193t + 34d_з + 0{,}15S - 0{,}44v - 16; \tag{4}$$

$$\begin{aligned} R_Z = {} & 14\phi + 811Z + 220I - 0{,}0008\phi^3 - 1444Z^3 - 0{,}04I^3 - 0{,}06\phi^2 Z - \\ & -11\phi Z^2 + 0{,}003\phi^2 I - 0{,}04\phi I^2 + 161Z^2 I - 7ZI^2 + 0{,}9\phi ZI - 3863, \end{aligned} \tag{5}$$

где t – глубина резания шлифовальным кругом, мм; $d_з$ – диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; S – рабочая скорость рельсошлифовального поезда (продольная минутная подача), м/мин; v – средняя скорость резания, м/с; n – частота вращения шлифовального круга, об/мин; k – коэффициент, учитывающий зернистость инструмента и ширину дорожки контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью; φ – угол наклона шлифовальной головки, град; I – токовая нагрузка на шлифовальных электродвигателях, А; Z – диаметр зерна шлифовального круга, мм.

Если величины X_i в модели (2) являются случайными, то математическое ожидание и дисперсия параметра качества будут иметь вид:

$$M\{Y\} = exp\left(ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^{k} ln X_i M\{\beta_i\} \right); \quad (6)$$

$$S^2\{Y_i\} = exp\left(ln S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^{k} (ln X_i)^2 S^2\{\beta_i\} \right). \quad (7)$$

Если в модели (2) случайны один или несколько факторов X_i, то $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$ определяются путем обработки результатов машинного эксперимента над имитационными моделями по схеме, представленной на рисунке 2.

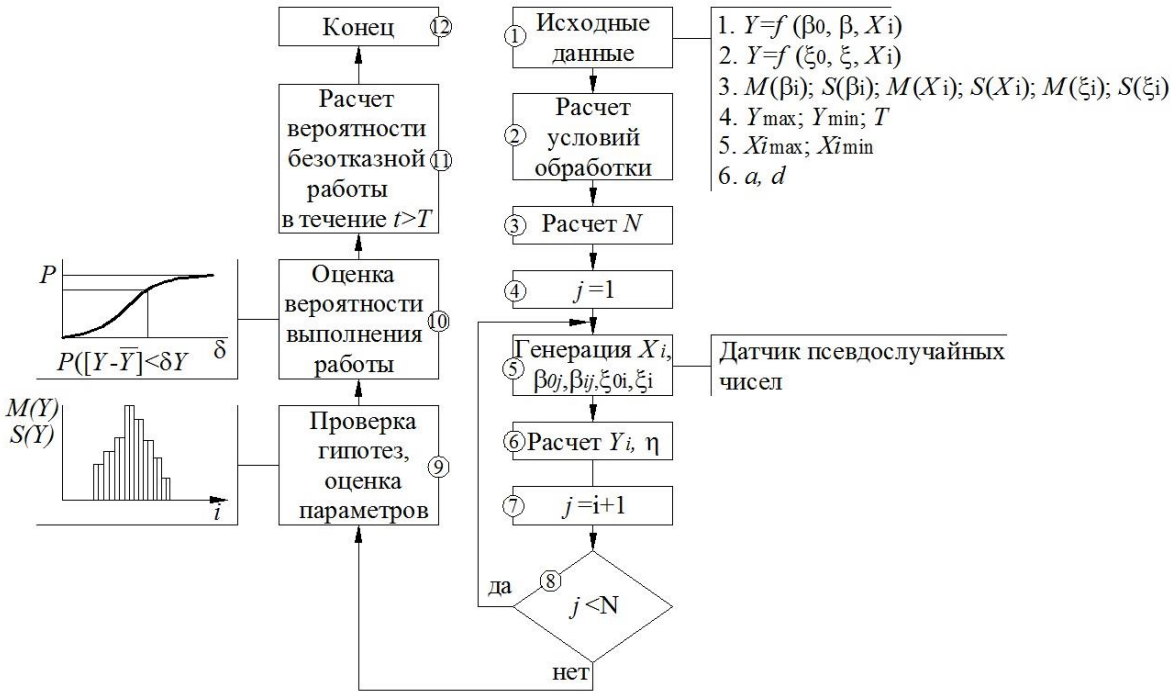


Рисунок 2 – Блок-схема расчета надежности технологических систем

В качестве исходных данных используются результаты построения имитационных моделей, а также конструкторские и технологические ограничения:

имитационная модель для параметра Y –

$$Y = f(\beta_0, \beta_i, X_i); \quad (8)$$

имитационная модель скорости изменения параметра Y в процессе функционирования технологической системы –

$$Y = f(\xi_0, \xi_i, X_i); \quad (9)$$

математические ожидания и среднеквадратические отклонения коэффициентов и случайных факторов обработки –

$$M\{\beta_i\}, S\{\beta_i\}, M\{\xi_i\}, S\{\xi_i\}, M\{X_i\}, S\{X_i\}; \quad (10)$$

допустимые пределы изменения параметров качества, поверхностного слоя рельса Y (Rz), заложенные в конструкторской документации, и время его безотказного обеспечения $\underline{Y}_{max}$, Y_{min}, T. Допустимые пределы варьирования технологических режимов обработки $Y_{i\,max}$, $Y_{i\,min}$,. Доверительная вероятность и допустимые абсолютные ошибки определения оценки $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$, величины a и d.

Далее определяют номинальные значения факторов X_i, которые обеспечивают параметры качества $Y_{опт}$ и предельные значения запаса технологического метода η по данному параметру. В имитационные модели при этом вводят коэффициенты $b_i = M\{\beta_i\}$.

Далее проводится планирование эффективного использования ресурсов. Результаты моделирования должны быть точными и достоверными.

Качество поверхности рельсов формируется в процессе их шлифования. Технологический процесс шлифования рельсов в реальных условиях подвергается воздействию детерминированных и случайных внешних возмущений. Выходная величина объекта управления есть случайная функция внешних возмущений и управляющих воздействий [1].

Для оценки точности процесса шлифования рельсов необходимо применить закон распределения, учитывающий вероятностный характер и случайность изменения показателей качества рельсов после шлифования. В качестве закона распределения случайной величины показателя качества рельсов после шлифования следует рассматривать дифференциальный закон распределения. На рисунке 3 представлен дифференциальный закон распределения показателей качества управляемого, отображенного кривой 2, и неуправляемого, отображенного кривой 1, технологического процесса.

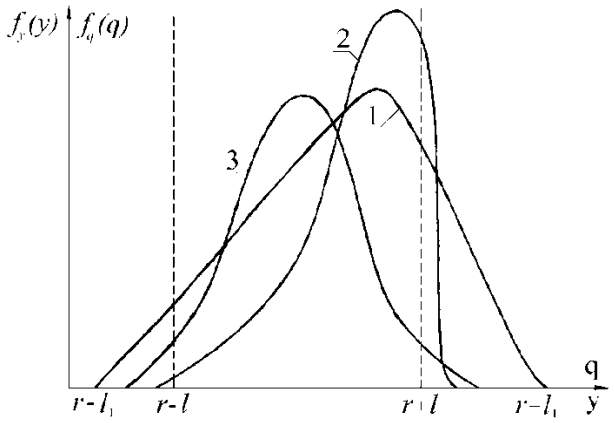


Рисунок 3 – Дифференциальные законы распределения показателя качества

В случае отсутствия управления точность процесса производства определяют по формуле, %:

$$T_q = 100 \int_{r-l}^{r+l} f_q(q) dq . \qquad (11)$$

В случае наличия системы управления, %,

$$T_y = 100 \int f_y(y)\, dy. \qquad (12)$$

Кривая 3 на рисунке 3 отображает закон распределения величины показателя качества. В этом случае точность процесса рельсошлифования определяется по формуле:

$$T_q = \Phi\left(\frac{l}{\sigma_q}\right)100, \qquad (13)$$

где $\Phi(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\varepsilon} e^{-\frac{1}{2}\varepsilon^2} d\varepsilon$ – интеграл вероятностей; $\varepsilon = \frac{q-r}{\sigma_q}$; $\sigma_q = \sqrt{D_q}$.

Управление технологическим процессом шлифования рельсов осуществляется с целью повышения его точности, при этом необходимо выполнять условие:

$$T_y > T_q. \quad (14)$$

Разработка технологического процесса шлифования рельсов должна включать в себя оценку показателей надежности, обеспечивающих качество поверхности рельсов при заданной производительности процесса шлифования. Результаты, полученные при оценке надежности на этапе подготовки технологического процесса шлифования рельсов, необходимо использовать при дальнейшем проектировании и совершенствовании данного технологического процесса.

При реализации существующих технологических процессов шлифования рельсов используются штатные программы обработки, заложенные в системе управления рабочим оборудованием рельсошлифовального поезда, которые не предполагают изменения режимов шлифования. Произведены расчеты вероятности технологического обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельсов в установленных диапазонах, определенных экспериментальными исследованиями. В качестве примера в таблице 2 представлены результаты расчетов для трех штатных программ.

Таблица 2 – Анализ вероятности обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельсов для управляющих программ рельсошлифовального поезда

Характеристика управляющей программы		Вероятность обеспечения шероховатости в требуемых диапазонах при угле наклона шлифовальной головки 30 град.	
		R_z 5÷10 мкм	R_z 35÷50 мкм
Программа 22 Скорость рельсошлифовального поезда $v_п$, км/ч Скорость резания $v_р$, м/с Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I, А	6 50 27	0,15	0,40
Программа 28 Скорость рельсошлифовального поезда $v_п$, км/ч Скорость резания $v_р$, м/с Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I, А	8 50 25	0,35	0,6
Программа 31 Скорость рельсошлифовального поезда $v_п$, км/ч 8 Скорость резания $v_р$, м/с 50 Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I, А 23	8 50 23	0,55	0,25

Таким образом, результаты расчетов позволяют определить наиболее подходящую программу шлифования рельсов, обеспечивающую максимальную вероятность формирования шероховатости поверхности в заданном диапазоне, в установленных условиях обработки.

Список литературы

1. Калкер, Д. Д. Качество поверхности рельсов и обслуживания при современных железнодорожных операциях [Текст] / Д. Д. Калкер, Д. Ф. Кэннон, О. Орринджер / Научные издатели Kluwer. – Нидерланды, 1993. – 459 с.

2. Нормативно-техническая документация. Технические указания по шлифованию рельсов [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2004. – 39 с.

3. Аксенов, В. А. Оценка эффективности технологического процесса шлифования рельсов в пути [Текст] / В. А. Аксенов, В. Н. Фефелов // Научное обозрение / Российская Академия естествознания. – М. – 2006. – № 3. – С. 28 – 30.

4. Аксенов, В. А. Передовые технологии восстановления рельсов в пути и управление качеством обработанных поверхностей при использовании рельсошлифовальных поездов [Текст] / В. А. Аксенов, В. А. Шаламов, А. А. Кузьменя // Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения. – Новосибирск. – 1999. – Вып. 2. – С. 129 – 135.

5. Ильиных, А. С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути [Текст] / А. С. Ильиных // Вестник Сибирского гос. техн. ун-та. – Новосибирск. – 2013. – № 1. – С. 82 – 88.

References

1. Kalker J. J., Cannon D. F., Orringer O. *Kachestvo poverkhnosti rel'sov i obsluzhivaniia pri sovremennykh zheleznodorozhnykh operatsiiakh* (Rail quality and maintenance for modern railway operation). Netherlands: Kluwer academic publishers, 1993, 459 p.

2. *Normativno-tekhnicheskaia dokumentatsiia. Tekhnicheskie ukazaniia po shlifovaniiu rel'sov* (Normative-technical documentation. Technical instructions for the rails grinding). Moscow, OAS «Russian railways», 2004, 39 p.

3. Aksenov V. A., Fefelov V. N. Efficiency evaluation of the rail grinding technology [Otsenka effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa shlifovaniia rel'-sov v puti]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific review*, 2006, no. 3, pp. 28 – 30.

4. Aksenov V. A., Shalamov V. A., Kuz'menia A. A. Modern technology of rail reestablishment and quality control of the treated surface using rail-grinding trains [Peredovye tekhnologii vosstanovleniia rel'sov v puti i upravlenie kachestvom obrabotannykh poverkhnostei pri ispol'zovanii rel'soshlifoval'nykh poezdov]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of the Siberian Transport University*, 1999, no. 2, pp. 129 – 135.

5. Il'inykh, A. S. Scientific and methodological basis for high-performance technology rail grinding in the railway [Nauchno-metodicheskie osnovy vysokoproizvoditel'noi tekhnologii shlifovaniia rel'sov v usloviiakh zheleznodorozhnogo puti]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* – Vestnik of the *Siberian Technical University*, 2013, no. 1, pp. 82 – 88.

УДК 656.078.12

А. А. Белов, А. Н. Ларин

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА

В статье рассматривается задача определения длины очереди составов, суммарной грузоподъемности транспорта, не обеспеченного грузом, количество груза, находящегося в момент времени на складе транспортного узла, с учетом стохастически независимых встречных пуассоновского и квазипуассоновского транспортных потоков. Задача решена с использованием математического аппарата теории массового обслуживания. Полученные результаты могут быть использованы для определения оптимальных значений складских емкостей и технологического запаса груза транспортного узла при заданном грузообороте.

Транспортный узел представляет собой совокупность транспортных процессов и средств для их реализации в местах стыкования двух или более видов транспорта. Узлы играют важную роль в организации комбинированных перевозок и совершенствовании взаимодействия различных видов транспорта.

Исследование влияния производительности погрузочно-разгрузочных механизмов на перерабатывающую способность транспортного узла основывается на статистическом анализе фактических данных о подходе транспортных единиц и железнодорожных составов к транспортному узлу и о длительности их грузовой обработки, в конечном итоге выражающейся длиной образуемых очередей. По существу применение теории очередей к задачам управления транспортным узлом сводится к механическому использованию готовых формул для определения основных характеристик обслуживания, полученных для простейших моделей, описывающих с равным успехом работу промтоварного магазина. В транспортном узле про-

исходит постоянное взаимодействие нескольких видов транспортных потоков. Учет данной особенности в большинстве случаев приводит к резкому усложнению моделей. При этом важную роль должны сыграть современные методы асимптотического и качественного анализа сложных вероятностных систем. С математической точки зрения исследование процесса взаимодействия двух и более потоков событий сопряжено с большими аналитическими трудностями. Для встречных транспортных потоков в некоторых частных постановках эта задача решалась в работах [1, 2], где исследовался процесс образования очередей при погрузке однородного груза, поступающего на железнодорожных составах. При этом потоки предполагались либо однородными пуассоновскими, либо регулярными.

В данной статье рассматривается задача оценки эксплуатационных характеристик транспортного узла на основе определения распределения случайной величины груза, ожидающего погрузки или выгрузки, а также свободной емкости транспортных средств с учетом ограничений по емкости складов в более общей, чем представлено в источнике [2], постановке. При этом в целях упрощения исследований принято, что пропускная способность погрузочно-разгрузочных устройств транспортного узла не ограничена, т. е. акцент делается на изучение механизма формирования очередей только из-за нехватки груза на складе или из-за отсутствия свободной складской емкости. Полученные результаты в ближайшее время планируется обобщить для случая конечной пропускной способности транспортных узлов.

Взаимодействие транспортных потоков может происходить как при погрузке на автомобильный транспорт груза, прибывающего в транспортный узел на железнодорожных составах, так и, наоборот, при погрузке груза, прибывающего на автомобильном транспорте, на составы. В первом случае будет говориться о прямой, а во втором – об обратной задаче.

Пусть в транспортный узел поступают стохастически независимые потоки автомобильного транспорта и железнодорожных составов, причем поток автомобильного транспорта – простейший с интенсивностью λ, а поток составов – квазипуассоновый с параметром ν и с распределением вероятностей числа составов в одной группе $\{b_i\}$, $i=\overline{1,e}$, где e – максимально возможное число составов в группе, $\sum_{i=1}^{e} b_i = 1$.

Состав, поступивший в узел, сразу же подается под разгрузку (погрузку), если имеется свободная складская емкость или автомобильный транспорт (груз на складе или на автомобильном транспорте). Временем перевода подачи вагонов на погрузочно-разгрузочный фронт и обратно пренебрегаем.

Грузоподъемность автомобильного транспорта будем измерять в единицах грузоподъемности состава и считать ее дискретной случайной величиной с распределением вероятностей $\{a_i\}$, $i = 0, 1, \ldots, r$, где r – грузоподъемность наибольшего из рассматриваемых видов автомобильного транспорта в единицах грузоподъемности состава, $\sum_{i=1}^{r} a_i = 1$.

Емкость склада в единицах грузоподъемности равна υ. Свободная емкость на складе в тех же единицах в начальный момент времени $t = 0$ равна υ_0 ($\upsilon - \upsilon_0$ начальный технологический запас груза на складе). Для простоты расчета принято, что υ и υ_0 – целые числа.

Согласованность в работе автомобильного транспорта и железной дороги по грузообороту, а также по срокам подачи тоннажа и составов выражается в том, что между параметрами λ и ν существует некоторая зависимость. Если такую зависимость устанавливать исходя из условия выполнения в среднем в плановом промежутке (0, T) плана по грузообороту [2], то $\lambda \bar{r} T = \nu \bar{e} T = Q$, или

$$\lambda \bar{r} = \nu \bar{e}, \tag{1}$$

где $\bar{r} = \sum_{i=1}^{r} i a_i$; $\bar{e} = \sum_{i=1}^{e} i b_i$; Q – средний грузооборот узла на период (0, T). При этом принимается

$$\lambda = N/T, \tag{2}$$

где N – планируемый в промежутке $(0, T)$ оборот автомобильного транспорта.

Полученные оценки для λ и ν при достаточно большом N вполне приемлемы для эксплуатационных расчетов, хотя и не учитывают наличие регулирования подачи автомобильного транспорта и железнодорожных составов внутри планового периода $(0, T)$. Влияние же такого регулирования становится ощутимым при сравнительно небольших значениях N, если в качестве $(0, T)$ взять декаду или месяц. Поэтому в этом случае оценку параметров λ и ν (при $b_1 = 1, b_i = 0, i = 2,3,\ldots, e$) можно производить исходя из условия минимизации выражения:

$$J(\lambda, \nu) = J_1(\lambda, \nu) + J_2(\lambda), \tag{3}$$

где

$$J_1(\lambda, \nu) = \lambda\nu \int_0^\infty \int_0^\infty (x-y)^2 \sum_{i=1}^{r} \sum_{k=1}^{N} a_i \frac{(\lambda\nu)^{k-1}(\nu x)^{ki-1}}{(k-1)!(ki-1)!} e^{-\lambda y - \nu x} dy dx, \tag{4}$$

$$J_2(\lambda) = \lambda \int_0^\infty (y-T)^2 \frac{(\lambda y)^{N-1}}{(N-1)!} dy. \tag{5}$$

Здесь слагаемое

$$\lambda\nu \int_0^\infty \int_0^\infty (x-y)^2 \frac{(\lambda y)^{k-1}(\nu x)^{ki-1}}{(k-1)!(ki-1)!} e^{-\lambda x - \nu x} dy dx \tag{6}$$

есть средний квадрат отклонения момента поступления k-го по счету автомобильного транспорта при условии, что он имеет грузоподъемность i, от момента прибытия соответствующей партии из i составов;

$J_1(\lambda, \nu)$ – средневзвешенная сумма всех таких отклонений.

Величина $J_2(\lambda)$ есть средний квадрат отклонения вероятного момента поступления последнего, N-го автомобильного транспорта от планового момента, в качестве которого принято T.

Произведя необходимые вычисления, получили:

$$\begin{aligned} J(\lambda, \nu) = {} & \frac{N(N+1)}{2\lambda^2}\left[\frac{2N+1}{3}+1\right] - \frac{N(N+1)(2N+1)}{3\lambda\nu}\bar{r} + \\ & + \frac{N(N+1)}{2\lambda^2}\left[\frac{2N+1}{3}\left(\frac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r}\right)+1\right]\bar{r} + \frac{N(N+1)}{\lambda^2} - \frac{2N}{\lambda}T + T^2, \end{aligned} \tag{7}$$

где

$$\sigma_a^2 = \sum_{i=1}^{r} \left(i - \bar{r}\right)^2 a_i. \tag{8}$$

Приравнивая частные производные $\partial J/\partial\lambda$, $\partial J/\partial\nu$ к нулю, получили следующую систему уравнений относительно $1/\lambda$, $1/\nu$:

$$\begin{cases} \dfrac{2(N+5)}{\lambda} - \dfrac{(2N+1)\bar{r}}{\nu} = \dfrac{6T}{N+1}; \\ \dfrac{2N+1}{3\lambda} - \dfrac{1}{\nu}\left[\dfrac{2N+1}{3}\left(\dfrac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r}\right)+1\right] = 0, \end{cases} \tag{9}$$

на основе решения данной системы получены следующие выражения:

$$\lambda = (N+1)\frac{9(2N+1)\bar{r} + 6(N+5) + 2(N+5)(2N+1)\sigma_a^2/\bar{r}}{6T\left[(2N+1)\left(\frac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r}\right) + 3\right]}; \quad (10)$$

$$\nu = \lambda\left[\frac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r} + \frac{3}{2N+1}\right]. \quad (11)$$

Отсюда при $N \gg 1$ следует приближенное равенство:

$$\nu \approx \lambda\left(\bar{r} + \frac{\sigma_a^2}{\bar{r}}\right), \quad (12)$$

которое отличается от условия (1) при $e = 1$, если $\sigma_a^2 \neq 0$.

Основной задачей является нахождение явных выражений для введенных ниже показателей эксплуатационных характеристик транспортного узла. Изложение приведено применительно к прямой задаче; располагая ее решением, легко получить и решение обратной задачи с помощью лишь перемены обозначений.

Пусть $p_k(t)$ – вероятность того, что в момент времени t в транспортном узле имеется количество груза (на составах и складах), равное грузоподъемности k составов, если $k \geq 0$. Если же $k < 0$, то $p_k(t)$ – вероятность того, что в момент времени t в порту имеется свободная емкость (т. е. суммарная грузоподъемность автомобильного транспорта, находящегося в этот момент в узле), равная грузоподъемности k составов.

Введем в рассмотрение следующие случайные функции: $G(t)$ – суммарная грузоподъемность автомобильного транспорта, не обеспеченная грузом, в момент времени t; $g(t)$ – суммарное количество груза, находящееся в момент времени t на составах в очереди; $q(t)$ – количество груза, находящегося в момент времени на складе, в тех же единицах.

К основным эксплуатационным характеристикам функционирования транспортного узла относятся усредненные для рассматриваемого планового периода математические ожидания:

$$g_{\text{ср}} = g_{\text{ср}}\left(Q, \upsilon_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b\right) = \frac{1}{T}\int_0^T M\left[g(t)\right]dt; \quad (13)$$

$$G_{\text{ср}} = G_{\text{ср}}\left(Q, \upsilon - \upsilon_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b\right) = \frac{1}{T}\int_0^T M\left[G(t)\right]dt; \quad (14)$$

$$q_{\text{ср}} = q_{\text{ср}}\left(Q, \upsilon, \upsilon_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b\right) = \frac{1}{T}\int_0^T M\left[q(t)\right]dt, \quad (15)$$

где

$$\sigma_b^2 = \sum_{i=1}^{e}\left(i - \bar{e}\right)^2 b_i. \quad (16)$$

Вместо $q_{\text{ср}}$ удобнее оперировать другим показателем – коэффициентом использования полезной емкости склада $k_{\text{исп}}$, определяемым по формуле: $k_{\text{исп}} = q_{\text{ср}}/\upsilon$.

Введем следующие обозначения: $X(t)$ – случайное число групп составов, прибывших в транспортный узел в интервале $(0, t)$; $Y(t)$ – случайное число единиц автомобильного транспорта, прибывших в транспортный узел в интервале $(0, t)$; $\xi_k, k = 1, 2, \ldots$ – дискретная случайная величина, равная числу составов, прибывших в k-й группе; $\zeta_k, k = 1, 2, \ldots$ – дискретная

случайная величина, равная грузоподъемности *k*-го автомобильного транспорта, прибывшего в транспортный узел.

Случайные величины ξ_k и ζ_k, $k \geq 1$ предполагаются независимыми в совокупности, причем ξ_k одинаково распределены по закону $\{a_i\}, i = \overline{1, r}$, а ζ_k – одинаково распределены по закону $\{b_i\}, i = \overline{1, e}$.

Пусть также

$$\begin{cases} \xi(t) = \sum_{k=1}^{X(t)} \xi_k; \\ \zeta(t) = \sum_{k=1}^{Y(t)} \zeta_k. \end{cases} \tag{17}$$

(считаем, что $\xi(t) = 0$, если $X(t) = 0$ и $\zeta(t) = 0$ если $Y(t) = 0$).

Количество груза на составах, ожидающих выгрузки (длина очереди составов). Под длиной очереди составов будем понимать усредненное для рассматриваемого планового периода математическое ожидание суммарного количества груза, находящегося на составах в очереди, $M[g(t)] = g_{\text{ср}}$. Легко видеть по определению, что $g(t) = [\xi(t) - \zeta(t) - \upsilon_0]^+$, где $[u]^+ = \max(0, u)$. Отсюда $P_{k+\upsilon}(t) = P\{g(t) = k\} = P\{\xi(t) - \zeta(t) = k + \upsilon_0\}, k > 0$. По формуле полной вероятности имеем:

$$P\{g(t) = k\} = P\{\zeta(t) = \zeta(t) + k + \upsilon_0\} = \sum_{n=0}^{\infty} P\{\zeta(t) = n\} \cdot P\{\zeta(t) = n + k + \upsilon_0\}. \tag{18}$$

Поскольку оба рассматриваемых транспортных потока можно считать квазипуассоновскими, то

$$\begin{cases} P\{\zeta(t) = n\} = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dz^n} e^{-\lambda t[1-a(z)]} \big|_{z=0} = \sum_{i=1}^{n} A_{ni} (\lambda t)^{e-\lambda t}, n > 0; \\ P\{\zeta(t) = 0\} = e^{-\lambda t}; \\ P\{\xi(t) = n\} = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dz^n} e^{-\nu t[1-b(z)]} \big|_{z=0} = \sum_{i=1}^{n} B_{ni} (\nu t)^i e^{-\nu t}, n > 0; \\ P\{\xi(t) = 0\} = e^{-\nu t}, \end{cases} \tag{19}$$

где

$$a(z) = \sum_{i=1}^{r} a_i z^i; \tag{20}$$

$$b(z) = \sum_{i=1}^{e} b_i z^i; \tag{20a}$$

$$A_{ni} = \sum_{(j_1, \ldots, j_n)} \frac{a_1^{j_1} a_2^{j_2} \ldots a_n^{j_n}}{j_1! j_2! \ldots j_n!}; \tag{21}$$

$$B_{ni} = \sum_{(j_1, \ldots, j_n)} \frac{b_1^{j_1} b_2^{j_2} \ldots b_n^{j_n}}{j_1! j_2! \ldots j_n!}, \tag{22}$$

и суммирование в последних суммах распространяется на множество наборов (j_1, j_2,… j_n) целых неотрицательных чисел, удовлетворяющих условиям:

$$j_1 + j_2 + \ldots + j_n = i; \; j_1 + 2j_2 + \ldots + nj_n = n. \tag{23}$$

Отметим, что $a_n = 0$ при $n > r$ и $b_n = 0$ при $n > e$. Подстановка соотношений (19) в правую часть (18) приводит к выражению:

$$P\{g(t) = k\} = \left\{ \sum_{j=1}^{k+\upsilon_0} B_{k+\upsilon_0},\ j(\nu t)^t + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^{n} A_n,\ i(\lambda t)^i \right] \times \right.$$
$$\left. \times \left[\sum_{j=1}^{n+k+\upsilon_0} B_{n+k+\upsilon_0},\ j(\nu t)^j \right] \right\} e^{-(\lambda+\nu)t},\ k > 0, \tag{24}$$

где $\nu = \lambda \bar{r} / \bar{e}$.

Если, к примеру, $a_i = 0, i = \overline{1, r-1}; a_r = 1; b_1 = 1,\ b_i = 0, i = 2,\ e$ (поток составов – простейший, грузоподъемность единиц автомобильного транспорта равна грузоподъемности r составов), то формулу (24) можно переписать в виде:

$$P\{g(t) = k\} = I_{k+\upsilon_0}(r,\ 2\lambda t) e^{-(1+r)\lambda t}, \tag{25}$$

где специальная функция $I_p(r, x)$ (обобщенная функция Бесселя) определяется посредством ряда [2]

$$I_p(r, x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(x/2)^i (rx/2)^{ri+p}}{i!(ri+p)!}, \quad p \geq 0. \tag{26}$$

Для этого частного случая найдем явное выражение для производящей функции:

$$\pi(z,t) = \sum_{k=1}^{\infty} P\{g(t) = k\} = z^k = \sum_{k=1}^{\infty} I_{k+\upsilon_0}(r, 2\lambda t) z^k e^{-(1+r)\lambda t}. \tag{27}$$

Перепишем соотношение (27) в виде:

$$\pi(z,t) = z^{-\upsilon_0} \left[F(z,t) - \sum_{k=1}^{\upsilon_0} I_k(r, 2\lambda t) z^k \right] e^{-(1+r)\lambda t}, \tag{28}$$

где

$$F(z,t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k(r, 2\lambda t) z^k. \tag{29}$$

Дифференцированием по t нетрудно установить справедливость соотношения:

$$\frac{\partial}{\partial t} F(z,t) = \lambda \left(rz + \frac{1}{z^r} \right) F(z,t) + \lambda r z I_0(r, 2\lambda t) - \frac{\lambda}{z^r} \sum_{k=1}^{r} I_k(r, 2\lambda t) z^k. \tag{30}$$

Интегрированием дифференциального уравнения (30) при начальном условии $F(z, 0) = 0$ получено выражение:

$$F(z,t) = \lambda e^{\left(rz+z^{-r}\right)\lambda t} \int_0^t e^{-\left(rz+z^{-r}\right)\lambda u} \left[rz I_0(r, 2\lambda u) - \frac{1}{z^r} \sum_{k=1}^{r} I_k(r, 2\lambda u) z^k \right] du. \tag{31}$$

Отсюда с учетом уравнения (28) получаем:

$$\pi(z,t) = z^{-\upsilon_0} \left\{ \lambda e^{\left(rz+z^{-r}\right)\lambda t} \int_0^t e^{-\left(rz+z^{-r}\right)\lambda u} \left[rz I_0(r, 2\lambda u) - \frac{1}{z^r} \sum_{k=1}^{r} I_k(r, 2\lambda u) z^k \right] du - \right.$$
$$\left. - \sum_{k=1}^{\upsilon_0} I_k(r, 2\lambda t) z^k \right\} e^{-(1+r)\lambda t}. \tag{32}$$

Используя формулу (32), можно находить моменты распределения длины очереди составов. Например:

$$M[g(t)] = \frac{\partial}{\partial z}\pi(z,t)\Big|_{z=1} = \lambda\int_0^t e^{-(1+r)\lambda u}\left[\sum_{k=1}^{r}(\upsilon_0 + r - k)I_k(r, 2\lambda u) - \right.$$
$$\left. - r(\upsilon_0 - 1)I_0(r, 2\lambda u)\right]du + \sum_{k=1}^{\upsilon_0}(\upsilon_0 - k)I_k(r, 2\lambda t)e^{-(1+r)\lambda t}. \quad (33)$$

Усреднение равенства (33) по промежутку (0, T) дает формулу:

$$g_{\text{ср}} = \lambda\left\{\int_0^T\left(1-\frac{t}{T}\right)e^{-(1+r)\lambda t}\left[\sum_{k=1}^{r}(\upsilon_0 + r - k)I_k(r, 2\lambda t) - r(\upsilon_0 - 1)I_0(r, 2\lambda t)\right]dt\right\} +$$
$$+\frac{1}{T}\sum_{k=1}^{\upsilon_0}(\upsilon_0 - k)\int_0^T e^{-(1+r)\lambda t}I_k(r, 2\lambda t)\,dt. \quad (34)$$

Формулы (24) и (34) довольно громоздки и неудобны для вычисления и изучения асимптотического поведения $g_{\text{ср}}$ при большом грузообороте. Получим более удобную для этой цели формулу. Очевидно, что

$$p_k(t) = P\{\xi(t) - \zeta(t) + \upsilon - \upsilon_0 = k\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \quad (35)$$

Умножая обе части равенства (35) на z^k и суммируя по k от $-\infty$ до $+\infty$, получим:

$$Mz^{\xi(t)-\zeta(t)+\upsilon-\upsilon_0} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_k = (t)z^k = z^{\upsilon-\upsilon_0}\,exp\left\{\lambda t\left[a\left(\frac{1}{z}\right)-1\right] + \nu t\left[b(z)-1\right]\right\}. \quad (36)$$

При этом использованы равенства:

$$\begin{cases} Mz^{\xi(t)} = exp\left\{\lambda t\left[a(z)-1\right]\right\}; \\ Mz^{\zeta(t)} = exp\left\{\nu t\left[b(z)-1\right]\right\}. \end{cases} \quad (37)$$

Применяя к выражению (36) формулу обращения, для $k > 0$ будем иметь:

$$p_k(t) = \frac{1}{2\pi i}\oint_C z^{-(k-\upsilon+\upsilon_0+1)}\exp\left\{\lambda t\left[a\left(\frac{1}{z}\right)-1\right] + \nu t\left[b(z)-1\right]\right\}dz, \quad (38)$$

причем можно считать, что контур C охватывает точки $z = 0$ и $z = 1$.

Из уравнения (35) следует, что

$$M\left[g(t)\right] = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{k+\upsilon}(t). \quad (39)$$

Заменив в соотношении (38) индекс k на $k+\upsilon$ и умножив обе части на k, после суммирования с учетом возможности почленного интегрирования ряда найдем

$$M\left[g(t)\right] = \frac{1}{2\pi i}\oint_C \frac{exp\left\{\lambda t\left[a(1/z)-1\right] + \nu t\left[b(z)-1\right]\right\}}{z^{\upsilon_0}(z-1)^2}dz. \quad (40)$$

Введем параметр $\delta = \upsilon_0/Q$, имеющий смысл начальной свободной емкости склада в единицах Q. После усреднения по промежутку (0, T) соотношения (40) с учетом (1) получим:

$$g_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi i Q}\oint_C \frac{f(z)\exp\left\{Q\left[S(z)-\delta \ln z\right]\right\}}{(z-1)^4}dz, \tag{41}$$

где

$$S(z) = \frac{1}{r}a\left(\frac{1}{z}\right)+\frac{1}{e}b(z)-\frac{1}{r}-\frac{1}{e};\ f(z)=\frac{(z-1)^2}{S(z)}. \tag{42}$$

Здесь учтено, что $\oint_C \frac{f(z)dz}{z^{v_0}(z-1)^4}=0$, в чем легко можно убедиться с помощью основной теоремы о вычетах.

При больших T (квартал, год) параметр $Q \gg 1$. Кроме того, очевидно, что v_0 соизмеримо с Q и поэтому реальные значения $\delta \in [0,1]$. Эти предпосылки дают возможность для расчета $g_{\text{ср}}$ получить асимптотическое разложение интеграла (41) при $Q \to \infty$.

Так как $S(1)=S'(1)=0,\ S''(1)=\left(\sigma_a^2/\bar{r}+\bar{r}+\left(\sigma_a^2/\bar{e}\right)+\bar{e}>0\right)$ и $f(z)$ аналитична при $|z|\geq 1$ (с помощью теоремы Руше можно показать, что кроме двукратного корня $z=1$ все остальные нули $S(z)$ лежат внутри единичного круга), то удовлетворяются все условия теоремы, доказанной Г. В. Поддубным [3], в которой рассматривается равномерное по $\delta \geq 0$ асимптотическое разложение интеграла типа (41).

Для дальнейшего анализа удобно ввести следующие обозначения:

$$\begin{cases}
\beta_0(w) = 3e^{-w^2/4}D_{-4}(w);\\
\beta_1(w) = \dfrac{D_{-3}(w)-wD_{-4}(w)}{D_{-4}(w)};\\
\beta_2(w) = \dfrac{D_{-1}(w)-3wD_{-2}(w)+3w^2D_{-3}(w)-w^3D_{-4}(w)}{D_{-4}(w)};\\
\phi(\rho_0) = S(\rho_0)-\delta \ln \rho_0,\quad \psi(\rho_0)=S''(\rho_0)+\dfrac{S(\rho_0)}{\rho_0};\\
\psi_1(\rho_0) = S'''(\rho_0)-\dfrac{2\delta}{\rho_0^3};\\
h_1(\rho_0) = \dfrac{f'(\rho_0)}{f(\rho_0)}\left[\psi(\rho_0)\right]^{-1/2};\\
h_2(\rho_0) = \dfrac{1}{6}\psi_1(\rho_0)\left[\psi(\rho_0)\right]^{-3/2};\\
w = (\rho_0-1)\left[Q\psi(\rho_0)\right]^{1/2},
\end{cases} \tag{43}$$

где $\rho_0 = \rho_0(\delta)$ – корень уравнения $xS'(x)-\delta=0$ такой, что $\rho_0(0)=1$; $D_k(w)$ – функция параболического цилиндра. Ограничиваясь первыми двумя членами разложения интеграла (41), с помощью указанной теоремы находим

$$g_{\text{ср}} = \left(Q,\delta,\bar{r},\bar{l},\sigma_a,\sigma_b\right) \approx \frac{1}{3}\sqrt{\frac{Q\psi^3(\rho_0)}{2\pi}}f(\rho_0)\beta_0(w)e^{Q\phi(\rho_0)+w^2/2}\times$$
$$\times\left[1+\left(h_1(\rho_0)\beta_1(w)+h_2(\rho_0)\beta_2(w)\right)Q^{-1/2}\right],\quad Q\gg 1. \tag{44}$$

Если $\upsilon = 0$, то из выражения (44) следует, что

$$g_{\text{ср}} = \left(Q, \delta, \bar{r}, \bar{l}, \sigma_a, \sigma_b\right) \approx \frac{1}{3} f(1) \sqrt{\frac{Q\left[S''(1)\right]^3}{2\pi}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{Q}{2\pi}\left[\frac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r} + \frac{\sigma_b^2}{\bar{l}} - \bar{l}\right]}. \quad (45)$$

Для вычисления $\rho_0(\delta)$ и функций от $\rho_0(\delta)$ можно использовать разложение Лагранжа. Для этого уравнение $\rho_0 S'(\rho_0) = \delta$ перепишем в виде: $\rho_0 = 1 + \delta \frac{\rho_0 - 1}{\rho_0 S'(\rho_0)}$. Отсюда для любой аналитической в окрестности точки $z = 1$ функции $F(z)$ имеем в некоторой окрестности точки $\delta = 0$

$$F\left(\rho_0(\delta)\right) = F(1) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^n}{n!} \frac{d^{n-1}}{dz^{n-1}} \left\{ F'(z) \left[\frac{z-1}{zS'(z)}\right]^n \right\}_{z=1}. \quad (46)$$

Удерживая два первых слагаемых из выражения (46), для малых δ получим:

$$F\left(\rho_0(\delta)\right) \approx F(1) + \frac{F'(1)}{S''(1)}\delta + \frac{\delta^2}{2\left[S''(1)\right]^2}\left[F''(1) - F'(1)\frac{2S''(1) + S'''(1)}{S''(1)}\right], \quad (47)$$

где $S'''(1) = -\frac{1}{\bar{r}}\sum_{i=1}^{r} i(i+1)(i+2)a_i + \frac{1}{\bar{e}}\sum_{i=3}^{e} i(i-1)(i-2)b_i$.

Обратимся теперь к определению $q_{\text{ср}}$. Поскольку $M\left[q(t)\right] = \sum_{k=1}^{\upsilon} k p_k(t) + \upsilon \sum_{k=\upsilon+1}^{\upsilon} p_k(t)$, то с учетом соотношения (38) найдем

$$M\left[q(t)\right] = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{z^{\upsilon+1} + \upsilon}{z^{\upsilon_0+1}(z-1)^2} \exp\left\{\lambda t\left[a\left(\frac{1}{z}\right) - 1\right] + \nu t\left[b(z) - 1\right]\right\} dz. \quad (48)$$

Усреднение равенства (48) по промежутку (0, *T*) приводит к следующему выражению для $q_{\text{ср}}$:

$$q_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi i Q} \oint_C \frac{f_1(z) \exp\left\{Q\left[S(z) - \delta \ln z\right]\right\}}{(z-1)^4} dz, \quad (49)$$

где $f_1(z) = \frac{\left(z^{\upsilon+1} + \upsilon\right)(z-1)^2}{zS(z)}$.

Из уравнения (49) видно, что асимптотика $q_{\text{ср}}$ (и, следовательно, $k_{\text{исп}}$) при $Q \to \infty$ определяется также формулой (44) с заменой функции $f(z)$ на $f_1(z)$. В частности, если $\upsilon_0 = 0$, то

$$k_{\text{исп}} \approx \frac{2}{3}\left(1 + \frac{1}{\upsilon}\right)\sqrt{\frac{Q}{2\pi}\left[\frac{\sigma_a^2}{\bar{r}} + \bar{r} + \frac{\sigma_a^2}{\bar{e}} + \bar{e}\right]}, \quad G \gg 1. \quad (50)$$

Суммарная свободная грузоподъемность транспортных средств, ожидающих погрузки. Для вывода формулы для $G_{\text{ср}}$, аналогичной (41), исходим из равенства:

$$p_{-k}(t) = P\left\{\zeta(t) - \xi(t) - (\upsilon - \upsilon_0) = k\right\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \quad (51)$$

Поскольку $M\left[G(t)\right]=\sum_{k=1}^{\infty} k p_{-k}(t)$, то аналогично выражению (40) найдем

$$M\left[G(t)\right]=\frac{1}{2\pi i}\oint \frac{\exp\left\{\lambda t\left[a(z)-1\right]+\nu t\left[b\left(\frac{1}{z}\right)-1\right]\right\}}{z^{\upsilon-\upsilon_0}(z-1)^2}dz. \qquad (52)$$

Усреднение соотношения (52) по промежутку $(0,T)$ приводит к равенству:

$$G_{\text{ср}}=\frac{1}{2\pi i Q}\oint_C \frac{\hat{f}(z)\exp\left\{Q\left[\hat{S}(z)-\hat{\delta}\ln z\right]\right\}}{(z-1)^4}dz, \qquad (53)$$

где $\hat{S}(z)=\frac{1}{r}a(z)+\frac{1}{e}b\left(\frac{1}{z}\right)-\frac{1}{r}-\frac{1}{e}$; $\hat{f}(z)=\frac{(z-1)^2}{\hat{S}(z)}$; $\delta=\frac{\upsilon-\upsilon_0}{Q}$.

Так как $\hat{S}(1)=\hat{S}''(1)=0$, $\hat{S}''(1)=\bar{r}+\bar{e}+\sigma_a^2/\bar{r}+\sigma_b^2/\bar{e}>0$, то для вычисления $G_{\text{ср}}$ при $Q\to\infty$ можно использовать формулу (44), в которую вместо $f(z), S(z)$ и δ следует подставить соответственно $\hat{f}(z), \hat{S}(z)$ и $\hat{\delta}$. Например, при $\bar{\upsilon}=\bar{\upsilon}_0$ $G_{\text{ср}}$ совпадает с выражением для $g_{\text{ср}}$, вычисленным при $\bar{\upsilon}_0=0$.

Найденные формулы для определения $g_{\text{ср}}$, $G_{\text{ср}}$, и $k_{\text{исп}}$ фактически дают решение и обратной задачи. Здесь имеет место один результат, относящийся к категории двойственности. Полученные результаты позволяют решить задачу определения оптимальных значений υ и υ_0 при заданном грузообороте Q. Целевой функцией могут служить, например, суммарные приведенные затраты, связанные с простоем тоннажа и созданием складских емкостей. Оптимизационная задача формулируется как задача целочисленного программирования.

Представило бы значительный практический и теоретический интерес обобщение результатов данной статьи на случай ненулевого времени погрузки-выгрузки транспортных средств. По-видимому, при изучении таких более общих и сложных моделей основным математическим аппаратом исследования должны служить различные асимптотические методы, такие как метод малого параметра, метод перевала, метод диффузионной аппроксимации и другие.

Список литературы

1. Зильдман, В. Я. Взаимодействие встречных транспортных потоков, имеющих пуассоновский характер при отсутствии регулирования [Текст] / В. Я. Зильдман, Г. В. Поддубный // Математические методы решения экономических задач. – М.: Наука, 1977. – Т. XIII. – Вып. 3. – С. 524 – 535.

2. Зильдман, В. Я. Влияние резервов складских емкостей на простой транспортных средств при наличии полного регулирования [Текст] / В. Я. Зильдман, Г. В. Поддубный // Математические методы решения экономических задач. – М.: Наука, 1974. – Вып. 6. – С. 167 – 179.

3. Поддубный, Г. В. Асимптотическое разложение одного класса интервалов со сливающимся плюсом и точкой перевала [Текст] / Г. В. Поддубный // Журнал вычислительной математики и математической физики / Российская академия наук. – М., 1982. – № 5. – С. 1052 – 1060.

References

1. Zildman V. Y., Poddubnyj G. V. Interaction of the counter transport flows having poisson character in the absence of regulation [Vzaimodejstvie vstrechnyx transportnyx potokov, imeyushhix puassonovskij xarakter pri otsutstvii regulirovaniya]. *Matematicheskie metody resheniya ekonomicheskix zadach – Mathematical methods of the solution of economic tasks.* Moskow, Science, 1977, T. XIII, no. 3, pp. 524 – 535.

2. Zildman V. Y., Poddubnyj G. V. Influence of reserves of warehouse capacities on idle time of vehicles in the presence of full regulation [Vliyanie rezervov skladskix emkostej na prostoj transportnyx sredstv pri nalichii polnogo regulirovaniya]. *Matematicheskie metody resheniya ekonomicheskix zadach – Mathematical methods of the solution of economic tasks.* Moskow, Science, 1974, no. 6, pp. 167 – 179.

3. Poddubnyj G. V. Asymptotic decomposition of one class of intervals with the merging plus and a point of the [Asimptoticheskoe razlozhenie odnogo klassa intervalov so slivayushhimsya plyusom i tochkoj perevala]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – Computational mathematics and mathematical physics*, 1982, no. 5, pp.1052 – 1060.

УДК 629.488

Д. Г. Евсеев, А. В. Мелихов

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕМОНТА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

В статье предложена новая методика, позволяющая определить уровень качества ремонта для любого отчетного периода в течение межремонтной эксплуатации. Приведен тестовый пример оценки качества деповского ремонта пассажирских вагонов.

Конкурентоспособность железнодорожного транспорта в пассажирских перевозках определяется многими факторами, такими как скорость, надежность, ритмичность, безопасность, комфорт, тариф и рядом других. При этом технический и качественный уровень пассажирского подвижного состава играет ключевую роль [1].

На рынке ремонтных услуг достаточно велика конкуренция среди вагоноремонтных предприятий, поэтому важно обеспечивать объективность и устанавливать единые принципы системы оценки качества ремонта пассажирских вагонов, поставляемых для нужд ОАО «РЖД».

Анализ статьи [3] позволил разработать аналогичную методику для оценки качества ремонта пассажирских вагонов с учетом условий эксплуатации и специфики подвижного состава.

Оценка качества ремонта пассажирских вагонов представляет собой комплекс операций, выполняемый для расчета показателей качества ремонта пассажирских вагонов, основанный на статистической обработке первичной информации об отказах вагонов и в первую очередь его узлов и агрегатов в установленный период эксплуатации после ремонта.

Выбор показателей качества для оценки пассажирских вагонов, поставляемых для нужд ОАО «РЖД» и его дочерних предприятий, проведен исходя из следующих основных требований:

– применяемость в ремонтном и эксплуатационном комплексах пассажирского хозяйства ОАО «РЖД» на всех уровнях;

– минимальность и достаточность количества используемых показателей для оценки качества продукции и услуг;

– практическая значимость показателей;

– простота физического смысла;

– пригодность для статистической оценки результатов эксплуатации пассажирских вагонов;

– достаточность существующей исходной информации для проведения расчетов;

– возможность использования для расчетной оценки на этапе проектирования пассажирских вагонов и подтверждения по результатам испытаний.

Таким образом, для оценки качества ремонта пассажирских вагонов с учетом изложенных выше требований выбраны следующие показатели.

Показатель безотказной работы (K) – численное значение, отражающее долю пассажирских вагонов, не имевших отказов в течение заданной наработки или установленного срока эксплуатации, выраженную в процентах (основной показатель).

$$K(m)_{abcdefghi} = (1 - \frac{n(t)}{N})100\ \%, \quad (1)$$

где N – число вагонов работоспособных (выпущенных из плановых видов ремонта) в начальный момент времени m;

m – отчетный период оценки качества (месяц, квартал, год выпуска вагона из планового ремонта);

$n(t)$ – количество вагонов из числа N, отказавших на отрезке от m до t по причине неисправностей производственного характера;

t – заданная наработка вагона (интервал в %) межремонтного норматива;

a – вид работ с вагоном (ДР, КР, КВР, КРМ) – обязательный индекс;

b – тип вагонов (купейный, некупейный, межобластной, РИЦ, СВ, ресторан, почтовый, багажный, вагоны всех типов с назначенным сроком службы 40 лет) – необязательный индекс;

c – владелец вагонов – необязательный индекс;

d – критерий (норматив) применяемой системы технического обслуживания и ремонта вагонов (календарный срок, «пробег») – необязательный индекс;

e – предприятие ремонта вагонов – необязательный индекс (при использовании [e] в расчетах показателей качества индексы [f, g, h] не применяются);

f – тип предприятий ремонта вагонов (заводы, депо) – необязательный индекс;

g – подчиненность предприятий ремонта вагонов (структурные подразделения ОАО «РЖД», прочие) – необязательный индекс;

h – территориальное расположение предприятий ремонта вагонов (железные дороги России, СНГ) – необязательный индекс;

i – группы неисправностей систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей (внутреннее оборудование, электрооборудование, кузов вагона, ходовые части вагона, установка кондиционирования воздуха, генератор, редукторно-карданный привод, экологически чистый туалетный комплекс, системы отопления и водоснабжения, тормозное оборудование, автосцепное устройство, система пожарной безопасности, радиооборудование, прочие неисправности) – необязательный индекс.

В прикладных задачах оценки качества ремонта показатель K применяется для определения достигнутого уровня качества поставляемой продукции на отдельно взятом вагоноремонтном предприятии или группы предприятий. Показатель K совместно с иной информацией маркетингового назначения может использоваться в рекламных целях для привлечения потенциальных потребителей услуг по ремонту подвижного состава.

Другим назначением показателя безотказной работы K является определение качества отремонтированных вагонов или услуг, полученных от различных поставщиков. При использовании в данной задаче показатель K, в частности, может рассматриваться как уровень восстановления работоспособности парка пассажирских вагонов в зависимости от выполненного планового вида ремонта и предприятия его выполнения. Результат оценки качества может

быть использован при выборе поставщика определенного вида продукции, в том числе запасных частей и комплектующих изделий или услуг по ремонту.

Параметр потока отказов (ω) – относительная величина, характеризующая в рассматриваемом периоде отношение количества отказов пассажирских вагонов к общему количеству вагонов.

$$\omega(m)_{abcdefghi} = \frac{r(t)}{N}, \quad (2)$$

где $r(t)$ – число отказов на отрезке от m до t из-за неисправностей систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей в течение заданной наработки вагонов.

Значение индексов [*abcdefghi*] для показателя ω соответствует индексам формулы определения показателя *K*.

Показатель ω также известен как «коэффициент качества» и широко применяется для оценки качества планового ремонта и изготовления вагонов в ОАО «РЖД», СНГ и странах Балтии с 2001 г.

Прикладное назначение показателя ω заключается в возможности его использования непосредственно в задачах управления качеством производственного предприятия в части мотивационного стимулирования.

Показатель параметра потока отказов ω может использоваться в финансовой деятельности вагоноремонтных предприятий при формировании стоимости услуги по производству плановых видов ремонта пассажирских вагонов, а также его узлов и агрегатов.

Отличительной особенностью данной системы оценки является применение двух показателей качеств – K и ω, так как это обусловлено различием видов подвижного состава и сроков планово-предупредительных ремонтов.

Условием для оценки качества ремонта пассажирских вагонов в установленный отчетный период является выполнение всех требований технических условий и нормативной документации на ремонт и техническое обслуживание пассажирского подвижного состава.

Основным функциональным назначением системы оценки качества является учет отказов из-за неисправностей систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей в период оценки качества.

Стоит отметить, что вагоноремонтное предприятие несет ответственность за качество отремонтированных вагонов или предоставленных услуг даже после проведенной оценки качества ремонта в установленный период.

Численные значения нормированных показателей качества ремонта пассажирских вагонов устанавливаются персонально для каждого объекта оценки качества с распределением по видам работ и значениям наработки.

Нормативное значение каждого показателя определяется программными средствами автоматизированной системы, предназначенной для решения задач по оценке качества ремонта пассажирских вагонов. Расчет численных значений нормированных показателей осуществляется один раз в год в начале календарного года и действует в течение года.

Нормативные значения качества по показателям $K_н$, $\omega_н$ устанавливаются по основному показателю – показателю *K*.

Норматив для показателя безотказной работы $K_н$ устанавливается методом подбора лучшего из текущих значений показателя *K*, достигнутых в течение трех последних лет по назначению максимальной наработки.

Норматив по показателю $\omega_н$ устанавливается по соответствующему значению показателя ω того же года и значению максимальной наработки, что и показатель безотказной работы (*K*).

Установленные нормативы качества действует в течение календарного года, после чего замещаются другими численными значениями нормативов, также полученных в результате расчета за последние три года для объекта оценки качества.

Выполнение операций по определению уровня качества ремонта пассажирских вагонов производится в следующем порядке.

1. Определение целевой задачи и выбор показателей качества, необходимых для ее решения.

2. Определение объекта оценки качества.

3. Определение вида работ с вагоном (ДР, КР, КВР, КРМ).

4. Определение отчетного периода оценки качества.

5. Определение наработки вагонов.

6. Определение дополнительных признаков или условий.

7. Подготовка исходных данных для расчета численных значений показателей качества.

8. Расчет численных значений показателей качества для заданного отчетного периода.

9. Определение уровня (оценка) качества продукции отчетного периода на основе сравнения полученных текущих значений с нормированными значениями показателей качества.

Пункт 1 предусматривает постановку целевой задачи и выбор показателей качества, для решения которой необходимо оценить уровень качества пассажирских вагонов. Задачи могут иметь различное назначение, но должны удовлетворять одному из двух условий:

– оценка качества поставленных вагонов;

– оценка качества потребляемых вагонов.

Одновременно может быть решена только одна из указанных задач.

Выбор необходимых для оценки качества показателей осуществляется из расчета получения только тех численных значений, которые направлены на решение поставленной задачи. Показатели качества могут быть использованы как комплексно, так и персонально.

Пункт 2 предусматривает «определение объекта оценки качества» в виде установления группировочного признака. В качестве признаков объектов могут приниматься

– вагоноремонтные предприятия, выполняющие плановые виды ремонта пассажирского подвижного состава;

– парк вагонов.

Пункт 3 предусматривает выбор одного из видов работ, для которого будет оценено качество ремонта.

Пункт 4 предполагает выделение периода работы предприятия или периода ввода в эксплуатацию отремонтированных пассажирских вагонов. Длительность периода должна быть равна или кратна одному календарному месяцу.

Пункт 5 предусматривает выделение интервала эксплуатации вагонов по «календарной продолжительности эксплуатации» или по «пробегу». Определение межремонтных нормативов производится в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 27.01.2012 № 140р.

При оценке качества по «календарной продолжительности эксплуатации» наработка вагонов устанавливается в сутках. В этом случае длительность задаваемого значения наработки должна быть кратной 30 суткам и должна находиться в пределах межремонтного периода.

При необходимости оценки качества по «пробегу» наработка вагонов устанавливается в километрах общего (с пассажирами + пустой) пробега. В этом случае длительность задаваемой наработки должна быть кратной 10 тыс. км общего пробега и также должна находиться в пределах межремонтного норматива.

Пункт 6 предусматривает детализацию требований на выборку данных по группировочным признакам. Данные признаки не являются обязательными и устанавливаются по мере необходимости. В качестве дополнительных признаков могут применяться требования на выборку:

по типу вагонов (купейный, некупейный, межобластной, РИЦ, СВ, ресторан, почтовый, багажный, вагоны всех типов с назначенным сроком службы 40 лет) – соответствует индексу *b* в формулах (1), (2);

по владельцу (собственнику) вагонов – соответствует индексу *c* в формулах (1), (2);

по критерию (нормативу) применяемой системы технического обслуживания и ремонта вагонов (календарный срок, «пробег») – соответствует индексу *d* в формулах (1), (2);

по наименованию предприятия ремонта вагонов – соответствует индексу *e* в формулах (1), (2); (при использовании этого условия индексы [*f*, *g*, *h*] не применяются);

по типу предприятий ремонта вагонов (заводы, депо) – соответствует индексу *f* в формулах (1), (2);

по подчиненности предприятий ремонта вагонов (ОАО «РЖД», прочие) – соответствует индексу [*g*] в формулах (1), (2);

по территориальному расположению предприятий ремонта вагонов (железные дороги России, СНГ) – соответствует индексу [*h*] в формулах (1), (2);

по группам неисправностей систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей (внутреннее оборудование, электрооборудование, кузов вагона, ходовые части вагона, установка кондиционирования воздуха, генератор, редукторно-карданный привод, экологически чистый туалетный комплекс, системы отопления и водоснабжения, тормозное оборудование, автосцепное устройство, система пожарной безопасности, радиооборудование, прочие неисправности) – соответствует индексу [*i*] в формулах (1), (2).

Пункт 7 предусматривает осуществление выборки исходной информации о работе пассажирских вагонов для расчетов показателей качества в соответствии с целевой задачей (см. пункт 1). Выборка осуществляется на основе информации уведомлений на ремонт вагона и уведомлений о приемке пассажирских вагонов из ремонта и сообщения с указанием фактически выполненного вагоном объема работ («пробега») на определенное событие в следующей очередности:

– устанавливается объект оценки качества (см. пункт 2);

– устанавливается значение вида работ с вагоном (ДР, КР, КВР, КРМ) (см. пункт 3);

– устанавливается отчетный период оценки качества (см. пункт 4);

– устанавливается значение наработки вагонов (см. пункт 5);

– устанавливаются дополнительные признаки или условия – (см. пункт 6);

– производится отбор поступления вагонов во внеплановый ремонт по неисправностям систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей в течение установленной наработки;

– сформированный по назначенным условиям массив данных применяется для расчета показателей качества.

Пункт 8 производится на основе данных, полученных в результате выполненных операций в соответствии с пунктом 7.

Пункт 9 производится прямым сравнением полученных в результате расчета фактических показателей качества для выбранного отчетного периода K, ω с нормированными значениями показателей качества для аналогичных условий по виду ремонта и значению наработки $K_н$, $\omega_н$.

Уровень качества по показателю безотказной работы (K) считается достаточным при соблюдении условия $K \geq K_н$.

Оценка качества по показателю параметра потока отказов (ω) осуществляется по условию $\omega \leq \omega_н$. При соблюдении данного условия уровень качества ремонта считается достаточным.

Для удобства восприятия информации представлен тестовый пример оценки качества ремонта пассажирских вагонов за отчетный период на основе условных данных филиалов ОАО «ФПК» с учетом следующих условий:

целевая задача – определение уровня качества деповского ремонта пассажирских вагонов за межремонтный период эксплуатации по показателям безотказной работы и параметра потока отказов;

объект оценки качества – вагоноремонтные предприятия;

вид работ с вагоном – деповской ремонт;

владелец вагонов – ОАО «ФПК»;

отчетный период оценки качества – все периоды (ежемесячно) для вагонов, находящихся в эксплуатации в пределах установленного календарного межремонтного норматива, который согласно последним изменениям в приказе 9Ц составляет три года, или 500000 км пробега;

наработка вагонов – реализованный календарный период эксплуатации вагонов с шагом 30 суток;

дополнительные условия – отсутствуют.

В соответствии с указанными условиями осуществляется выборка информации на основе уведомлений о приемке пассажирских вагонов из ремонта. Учету подлежит каждая запись по номеру вагона, отремонтированного деповским ремонтом за три года с их разделением по календарным месяцам года. Оценка качества проводилась в январе 2012 г., тогда учету подлежат вагоны, вышедшие из деповского ремонта начиная с 1 января 2009 г. по 31 декабря 2011 г. включительно.

Для каждого учтенного номера вагона по информации уведомления на ремонт вагона осуществляется проверка поступления во внеплановый текущий ремонт (ТР) или досрочный плановый (ДР) в период его фактической эксплуатации, считая от даты поступления в эксплуатацию после окончания деповского ремонта с шагом 30 суток. В случае постановки вагона в очередной плановый или досрочный плановый ремонт по техническому состоянию окончанием межремонтного периода для вагона является дата его поступления в очередной или досрочный плановый ремонт.

Каждое уведомление о поступлении указанных вагонов в ремонт проверяется на наличие групп неисправностей систем пассажирских вагонов, произошедших по вине поставщиков запасных частей и в случае выявления отцепки вагона принимается к дальнейшему учету.

На основе выборки данных о поступлении учетной группы пассажирских вагонов во внеплановый или досрочный плановый ремонт по техническому состоянию с указанием номера пассажирского вагона для каждой отцепки в период с 1 января 2009 г. по 31 декабря 2011 г. выполняется численный расчет показателей качества. Показательно взят март 2011 г., когда было выпущен 681 пассажирский вагон с наработкой 30 суток. За этот период было отмечено восемь неисправностей систем вагонов, которые привели к восьми отказам пассажирских вагонов.

Расчет численных значений показателей качества деповского ремонта по показателю безотказной работы производится в соответствии с формулой (1).

Так, показатель K для пассажирских вагонов, выпущенных из деповского ремонта в марте 2011 г. с наработкой 30 суток, составляет:

$$K(m)_a = (1 - \frac{8}{718})100\,\% = 98{,}89.$$

Расчет численных значений параметра потока отказов производится по формуле (2).

Так, показатель ω для пассажирских вагонов, выпущенных из деповского ремонта в марте 2011 г. с наработкой 30 суток, составляет:

$$\omega(m)_a = \frac{8}{718} = 0{,}01.$$

Результаты расчетов показателя K и ω для каждого периода оценки заносятся в специальные таблицы отчетности в виде матриц, которые из-за громоздкости не отражены в статье, но позволили построить с помощью Microsoft Excel трехмерную математическую модель для каждого из показателей качества (рисунки 1, 2).

Сравнение полученных численных значений с нормированным показателем безотказной работы и нормированным показателем параметра потока отказов (таблица) позволяет оценить качество деповского ремонта пассажирских вагонов.

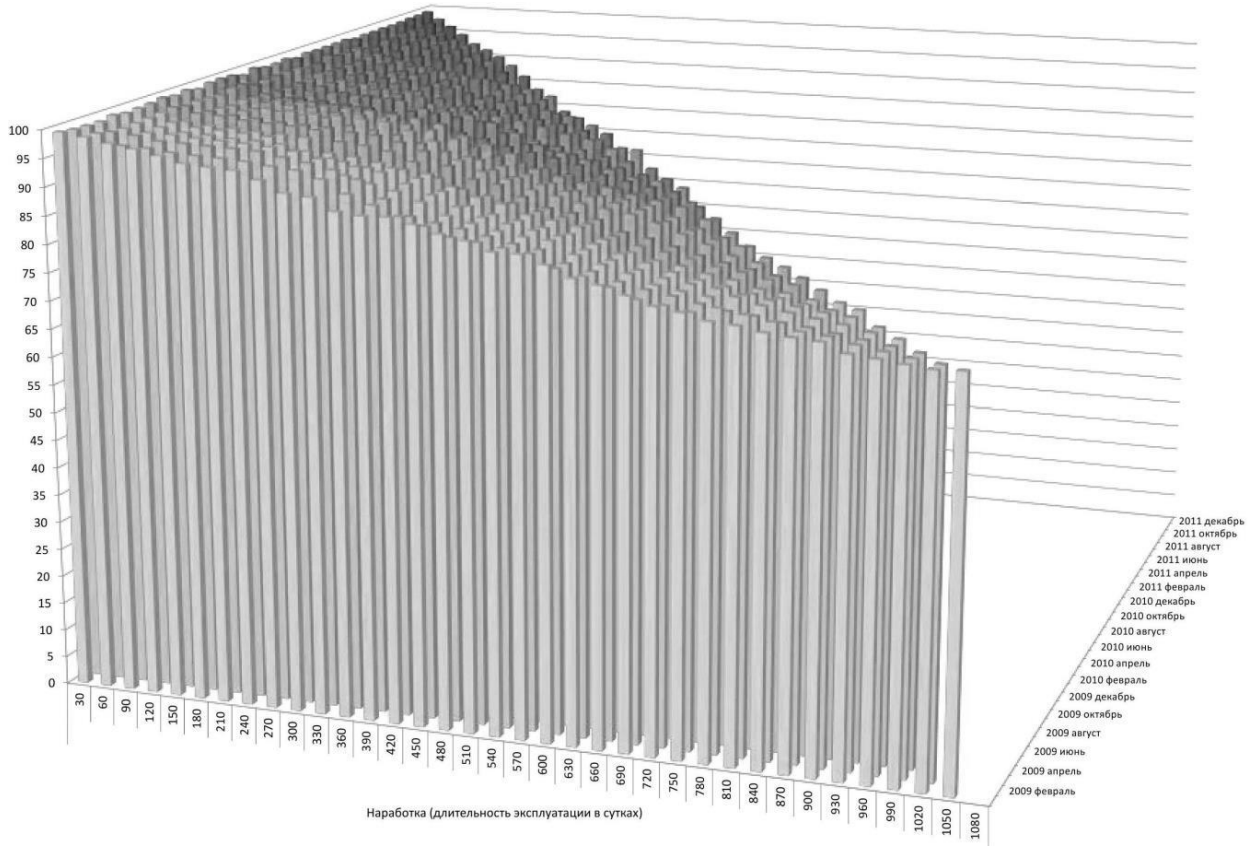


Рисунок 1 – Результаты расчета показателя безотказной работы (K)

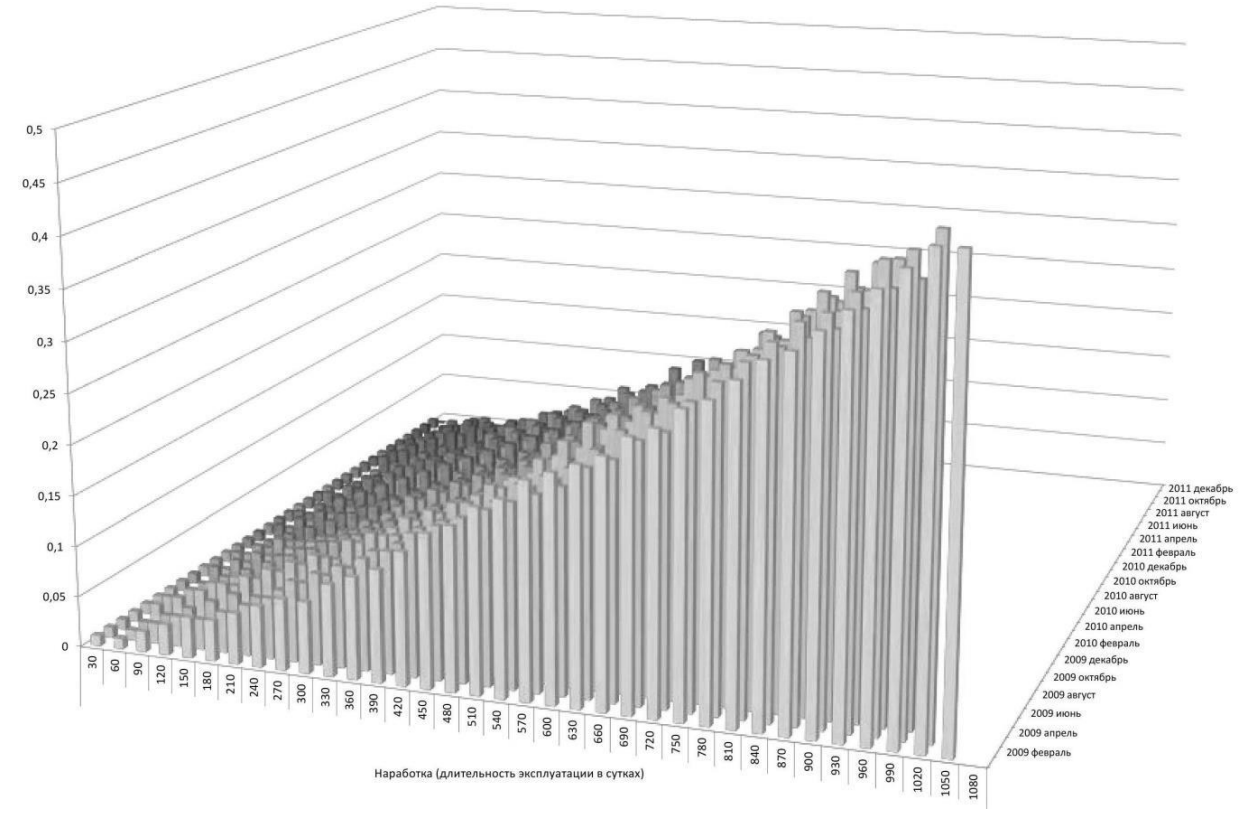


Рисунок 2 – Результаты расчета параметра потока отказов (ω)

Таким образом, сравнение численных значений показателей качества за март 2011 г. с нормированными показателями (см. таблицу) подтверждает, что уровень качества деповского ремонта является достаточным, так как соблюдены следующие условия:

– для показателя K: 98,89 ≥ 98,84;

– для показателя ω: 0,01≤ 0,01.

Справочные значения нормированных показателей качества для деповского ремонта пассажирских вагонов

Наработка (сутки)	$K_н$	$\omega_н$	Наработка (сутки)	$K_н$	$\omega_н$
30	98,84	0,01	570	83,56	0,2
60	98,36	0,01	600	82,21	0,21
90	97,42	0,02	630	80,8	0,23
120	96,8	0,03	660	79,44	0,24
150	96,33	0,04	690	78,13	0,25
180	95,95	0,05	720	77,14	0,27
210	95,48	0,06	750	76,36	0,29
240	94,76	0,07	780	75,82	0,31
270	93,68	0,08	810	75,31	0,32
300	93,14	0,09	840	74,55	0,34
330	92,3	0,1	870	73,96	0,36
360	91,13	0,11	900	73,69	0,38
390	89,71	0,12	930	72,54	0,39
420	88,32	0,13	960	71,93	0,42
450	87,23	0,14	990	71,31	0,43
480	86,05	0,16	1020	70,9	0,46
510	85,09	0,17	1050	71,23	0,45
540	84,16	0,19	1080	70,62	0,47

Приведенный тестовый пример показывает возможность применения данной методики для оценки любого отчетного периода и любого значения наработки пассажирских вагонов в течение межремонтной эксплуатации. При этом значения показателей по диагонали матриц указывают на текущее состояние качества по всему парку пассажирских вагонов, находящемуся в эксплуатации. В свою очередь трехмерные математические модели позволяют анализировать состояние парка пассажирских вагонов, так как являются наглядным графическим примером оценки качества ремонта.

Список литературы

1. Лисевич, Т. В. Передовые технологии деповского ремонта пассажирских вагонов [Текст] / Т. В. Лисевич / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2005. – 80 с.

2. Быков, Б. В. Технология ремонта вагонов [Текст] / Б. В. Быков, В. Е. Пигарев. – М.: Желдориздат, 2001. – 559 с.

3. Малышев, Ю. В. Новая оценка качества ремонта [Текст] / Ю. В. Малышев // Вагоны и вагонное хозяйство. – М. – 2009. – № 3. – С. 10 – 12.

References

1. Lisevich T. V. *Peredovye tekhnologii depovskogo remonta passazhirskikh vagonov* (Advanced technology depot repair passenger cars). Samara: Samarskii gos. un-t putei soobshcheniia, 2005, 80 p.

2. Bykov B. V., Pigarev V. E. *Tekhnologiia remonta vagonov* (Technology wagon repair). Moscow: Zheldorizdat, 2001, 559 p.

3. Malyshev Iu. V. A new assessment of the quality of repair [Novaia otsenka kachestva remonta]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo – Economy cars and cars*, 2009, no. 3, pp. 10 – 12.

УДК 629.424.001.57

РАСЧЕТ СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДРЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ

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.

В статье представлена методика расчета количества продуктов сгорания дизельного и газодизельного топлива, модельные расчеты выполнены применительно к тепловозному дизелю 16ЧН26/26 (2А-5Д49). Параметры рабочего цикла дизеля, работающего на различных видах углеводородного топлива, рассчитаны с использованием комбинации методов Гриневецкого – Мазинга и Вибе. Расчет количества вредных выбросов и количества парниковых газов выполнен с использованием метода равновесного состава с учетом изменения термодинамических параметров выгорания топлива и элементарного состава топливной смеси по позициям контроллера машиниста.

Ключевые слова: *тепловозный дизель 16ЧН26/26 (2А-5Д49), газодизельный цикл, элементарный состав топливной смеси, параметры выгорания топливной смеси.*

CALCULATION OF COMBUSTION IN THE CYLINDER OF A DIESEL ENGINE THAT RUNS ON GAS-AND-DIESEL CYCLE

Anisimov Alexander Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the dapartament «Locomotives», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-17.

The article presents the method of calculating the amount of products of combustion of diesel fuel, gas-and-diesel and model calculations are made in relation to the diesel engine 16ЧН26/26 (2A-5D49). Parameters of the working cycle of a diesel engine operating on different types of hydrocarbon fuels, derived using a combination of methods Grinevetskiy-Mazinga and vibe. Calculation of the amount of harmful emissions and the amount of greenhouse gases is made using the method of equilibrium composition due to changes in the thermodynamic parameters and elemental composition of fuel burnup fuel mixture the positions of controller driver

Keywords: *the diesel 2A-5D49, gas-and-diesel cycle, elementary composition of fuel mix fuel mixture burn settings.*

УДК 621.33

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И РЕЖИМОВ ИК-ЭНЕРГОПОДВОДА НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дульский Евгений Юрьевич
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy@mail.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

Худоногов Анатолий Михайлович
Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
E-mail: hudonogov@irgups.ru

С целью продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава была предложена технология восстановления изоляции с использованием энергии инфракрасного излучения, позволившая повысить качество изоляции по показателям пробивного напряжения и твердости. Статья посвящена анализу и оценке экспериментальных исследований, проводимых в двух различных значимых работах по данному направлению. Представлен анализ данных работ в плане отличительных особенностей и выводов по результатам экспериментальных исследований. По результатам анализа сформулирована новая гипотеза о необходимости учета при капсулировании изоляции и ее упругости. Также заданы новые направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *электрические машины тягового подвижного состава, изоляция, сушка, инфракрасное излучение, электрический пробой*.

INFLUENCE CHEMICAL PROPERTIES OF POLYMERS AND MODES IR-ENERGY SUPPLY ON THE STRENGTH AND PLASTICITY INSULATION IN LOCAL TECHNOLOGY TO EXTEND THE LIFE OF ELECTRIC CARS TRACTION ROLLING STOCK

Dulsky Evgeny Urievich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Ph. D., teacher of the department «Electrorolling composition», ISTU.
Phone: 8-983-403-46-43.
E-mail: E.Dulskiy @ mail.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

Khudonogov Anatoliy Mihaylovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electrorolling composition», ISTU.
E-mail: hudonogov@irgups.ru

In order to extend the service life of electric machines traction rolling stock has been proposed recovery technology insulation using infrared energy, will improve the quality of insulation in terms of the breakdown voltage and hardness. This article analyzes and estimated of experimental studies conducted in two different meaningful of the work in this direction. Presents an analysis these works in terms of distinctive features and conclusions of the pilot studies. According to the analysis formulated a new hypothesis about the need to address when capsulating the insulation and its elasticity. Also set new directions for future research.

Keywords: *electric machines of traction rolling stock, insulation, drying, infrared radiation, electrical breakdown.*

УДК 533.17

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА СКВОЗЬ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТЕЛЕ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

Кондратенко Евгений Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: 8-950-792-57-27.
E-mail: evgenkond@mail.ru

В соответствии с введением новых правил, регламентирующих методы и средства проведения неразрушающего контроля при ремонте деталей и узлов подвижного состава, контроль котлов железнодорожных цистерн проводится ультразвуковыми и капиллярными методами [1]. При этом контролю подвергаются все сварные швы котла, что в условиях вагоноремонтного депо практически невозможно. Это связано с большими объемами и сложностью конструкции объекта контроля, что влечет за собой нарушение регламента ремонта одной подвижной единицы.

Решение этой задачи требует создания методик, обеспечивающих обнаружение и оценку размеров сквозных дефектов по информации, полученной дистанционными способами.

В статье приведено описание построения математической модели газодинамического движения через сквозные дефекты в теле котла железнодорожной цистерны при проведении теплового контроля герметичности котлов цистерн. Созданная математическая модель позволяет учесть процессы истечения газа при малом перепаде давления и влиянии уровня шероховатости внутренней поверхности сквозного канала на формирование струи истекающего газа. Такое истечение газа способствует образованию в приповерхностном слое котла температурных аномалий, анализ которых позволит оценить геометрические параметры течи дистанционными методами.

Приведено сравнение результатов теоретического моделирования и экспериментальных исследований скорости истечения газа и температуры потока при различных условиях.

В ходе исследования определены законы истечения газа сквозь ряд классических моделей сквозных дефектов. Полученные результаты позволяют корректировать уровень браковоч-

ной чувствительности температуры при проведении тепловизионного контроля герметичности котлов железнодорожных цистерн [2].

Ключевые слова: *тепловой контроль, котел цистерны, скорость истечения газа, сквозной дефект, температура потока газа.*

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS GAS OUTFLOW THROUGH SMALL BODY OPENING BOILER RAILROAD TANK CARS

Kondratenko Evgenij Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Wagons and wagon farm», OSTU.
Phone: 8-950-792-57-27.
E-mail: evgenkond@mail.ru

The paper describes a mathematical model of gas-dynamic movement through the through defects in the body of the boiler tank cars. The mathematical model allows to take into account the processes of gas flow at low pressure drop and the impact of the level of roughness of the inner surface of the through channel formation jet escaping gas. The comparison of the results of theoretical modeling and experimental studies of the velocity of the gas flow and temperature under different conditions.

The study identified the laws of gas flow through a series of classic models through defects. Shows the dependence of the temperature of the escaping gas flow from the exhaust velocity and the level of roughness of the internal surface of the through channel, which allows us to estimate the nature of gas flow and temperature gradient.

The obtained results allow to adjust the level of sensitivity to rejection temperature during thermal leakage control boilers railway tanks.

Keywords: *thermal control boiler tank, the velocity of gas flowing, through the defect, the temperature of the gas flow.*

УДК 629.471

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕПЛОВОЗОВ

Лакин Игорь Капитонович
ООО «ТМХ-Сервис».
105064, г. Москва, Яковапостольский пер., д. 12, стр.1.
Доктор технических наук, начальник Департамента научно-технического развития ООО «ТМХ-Сервис».
Тел.: (495) 989-63-60, доб. 189.
E-mail: i.k.lakin@tmh-service.ru

Аболмасов Алексей Александрович
ООО «ТМХ-Сервис».
105064, г. Москва, Яковапостольский пер., д. 12, стр.1.
Аспирант, начальник отдела научно-технического развития ООО «ТМХ-Сервис».
Тел.: (495) 989-63-60, доб. 219.
E-mail: a.a.abolmasov@tmh-service.ru

Мельников Виктор Александрович
ООО «ТМХ-Сервис».
105064, г. Москва, Яковапостольский пер., д. 12, стр.1.
Аспирант, главный специалист отдела научно-технического развития ООО «ТМХ-Сервис».
Тел.: (495) 989-63-60, доб. 195.
E-mail: v.a.melnikov@tmh-service.ru

Бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) современных тепловозов позволяют не только управлять оборудованием тепловоза, но и анализировать процесс их работы при помощи методов математической статистики, что подтверждается исследованиями авторов статьи. Предложен метод диагностирования предотказных состояний с использованием корреляционного анализа данных МСУ.

Ключевые слова: *диагностика, мониторинг, бортовые микропроцессорные системы, статистика, статистический анализ, корреляционный анализ.*

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS THROUGH DPU DIAGNISTICS

Lakin Igor Kapitonovich
LLC «TMKh-Service».
12, build 1, Yakovapostolsky lane, Moscow, 105064, Russia.
Dr. Sci. Tech., head of the department of scientific and technological development LLC «TMKh-Service».
Phone: (495) 989-63-60, add. 189.
E-mail: i.k.lakin@tmh-service.ru

Abolmasov Alexey Alexandrovich
LLC «TMKh-Service».
12, build 1, Yakovapostolsky lane, Moscow, 105064, Russia.
Post-graduate student, head of scientific and technological development of LLC «TMKh-Service».
Phone: (495) 989-63-60, add. 219.
E-mail: a.a.abolmasov@tmh-service.ru

Melnikov Viktor Alexandrovich
LLC «TMKh-Service».
12, build 1, Yakovapostolsky lane, Moscow, 105064, Russia.
Post-graduate student, chief specialist of the scientific and technical development of LLC «TMKh-Service».
Phone: (495) 989-63-60, add. 195.
E-mail: v.a.melnikov@tmh-service.ru

Modern locomotive on board microprocessor-based control systems (MSU) can be used for not only controlling locomotive equipment, but for analyzing the process of their functioning too by means of mathematical statistics. It is confirmed by authors of this article. Through the article is offered method of nearby-failure condition diagnostic by the means of MSU data correlation analysis.

Keywords: *diagnostics, monitoring, onboard microprocessor-based control systems, statistics, statistical analysis, correlation analysis.*

УДК 629.424.1

ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

Михеев Владислав Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-72.
E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

В статье рассматривается подход к обобщенной оценке технического состояния функциональных подсистем энергетической установки тепловоза, основанный на сведении частных параметров, выделенных по результатам анализа граф-модели, к одномерной временной функции с использованием математического выражения нелинейного среднего. Представлены результаты обобщенной оценки технического состояния топливной системы энергетической установки.

Ключевые слова: *энергетическая установка тепловоза, граф-модель, обобщенный параметр технического состояния.*

GENERALIZED EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF THE DIESEL LOCOMOTIVE POWER PLANT FUNCTIONAL SUBSYSTEMS

Mikheyev Vladislav Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Cars and carriage economy», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-72.
E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

The article discusses the approach to generalized evaluation of technical condition of the diesel locomotive power plant functional subsystems based on the reduction of private parameters extracted by results of the analysis graph model to one-dimensional time function with use of mathematical expression of a nonlinear medium. Results of generalized evaluation of technical condition of the power plant fuel system are presents.

Keywords: *diesel locomotive power plant; graph model; generalized evaluation of technical condition.*
УДК 629.4

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКИПАЖА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СО СТОРОНЫ ПУТИ

Нехаев Виктор Алексеевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Николаев Виктор Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Челтыгмашев Евгений Павлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-16-88.

Сформирована математическая модель, описывающая динамику механической колебательной системы «железнодорожный экипаж – путь» в продольной вертикальной плоскости симметрии. Выполнено эквивалентное преобразование ее расчетной схемы. Рассмотрены способы линеаризации нелинейных характеристик. Сформирована модель «обобщенного» экипажа для оценки действующих на него ударных импульсов со стороны стыков рельсов.

Ключевые слова: *механическая колебательная система «железнодорожный экипаж – путь», математическая модель движения железнодорожного экипажа, способ линеаризации, «обобщенный» экипаж.*

RATIONALE FOR SELECTION DESIGN SCHEME OF RAILWAY VEHICLES FOR EVALUATION PULSE INFLUENCE FROM PATH

Nehaev Victor Alekseevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nehaevVA@omgups.ru

Nikolaev Victor Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.
E-mail: nikolaevVA@omgups.ru

Cheltygmashev Eugene Pavlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate of the departament «Theoretical mechanics», OSTU.
Phone: (3812) 31-16-88.

A mathematical model describing the dynamics of mechanical oscillatory systems «rolling stock train -railway track» in the vertical longitudinal plane of symmetry. Is equivalent to convert-

ing the design scheme. Linearization of nonlinear characteristics in ways. A model of the «generalized» track to assess the existing shock pulses from the joints of rails.

Keywords: *mechanical oscillatory systems «train crew-path», a mathematical model that is equivalent to converting the design scheme, Linearization methods, «generalized» track.*

УДК 629.4.027.4

ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ВАГОННЫХ КОЛЕС, ПОСТУПАЮЩИХ В РЕМОНТ С ДЕФЕКТАМИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Обрывалин Алексей Викторович
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: obryvalin_av@mail.ru

Кваскова Наталья Александровна
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-11.
E-mail: 90789@mail.ru

В статье рассматривается вопрос о возможности продления срока службы вагонных колес путем влияния на технологические параметры восстановления их профиля катания. Выполнен корреляционный анализ статистических данных по объемам механической обработки и величине дефектов на поверхности катания колес, поступающих в ремонт. Предложен механизм назначения припуска на механическую обработку профиля катания колеса, который позволит сократить необоснованный расход металла обода колеса в стружку.

Ключевые слова: *вагонное колесо, термомеханическое повреждение, типовой технологический процесс, припуск на механическую обработку, корреляционный анализ, срок службы.*

EXTENSION OF SERVICE LIFE OF THE CARRIAGE WHEELS ARRIVING IN REPAIR WITH DEFECTS OF THE THERMOMECHANICAL ORIGIN

Obryvalin Aleksey Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Technology of transport mechanical engineering and rolling stock repair», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: obryvalin_av@mail.ru

Kvaskova Natalia Aleksandrovna
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.
Post-graduate student of the department «Technology of transport mechanical engineering and rolling stock repair», OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: 90789@mail.ru

In article the question about possibility of extension of service life of carriage wheels by influence on technological parameters of restoration of their driving profile is considered. The correlation analysis of statistical data on volumes of machining and the size of defects on a driving surface of the wheels coming to repair is made. The mechanism of purpose of an allowance for machining of a driving profile of a wheel which will allow to reduce an unreasonable consumption of metal of a rim of a wheel in shaving is offered.

Keywords: *carriage wheel, thermomechanical damage, standard technological process, allowance for machining, correlation analysis, service life.*

УДК 629.423.31; 621.822

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОФРИКЦИОННОМ ГАСИТЕЛЕ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Файзибаев Шерзод Сабирович
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.
Доктор технических наук, профессор, проректор по науке и подготовке научно-педагогических кадров ТашИИТа.
Тел.: (8-109-98-71) 299-00-06.
E-mail: icenter@tashiit.uz

Хромова Галина Алексеевна
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрический транспорт и высокоскоростной электроподвижной состав», ТашИИТ.
Тел.: (8-109-98-71) 293-59-53.
E-mail: psion2@sarkor.uz

Махамадалиева Малика Алиевна
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).
100167, г. Ташкент, Миробадский район, Республика Узбекистан, ул. Адылходжаева, 1.
Студентка, ТашИИТ.
Тел.: (8-109-98-71) 293-59-53.
E-mail: reine_m@mail.ru

В статье предлагается численно-аналитический метод, основанный на методе граничных элементов (Method of Boundary Elements Technology), который служит для оценки закономерностей изменения температурных полей в рабочей жидкости в гидрофрикционном гасителе колебаний телескопического вида при изменении температуры окружающей среды. Данный метод учитывает физико-механические свойства рабочей жидкости, температуру налива и окружающей среды, скорость движения электроподвижного состава и высоту налива рабочей жидкости.

Ключевые слова: *анализ, гидрофрикционный гаситель колебаний, демпфер, изотермические линии, пространственная модель*.

NUMERICAL STUDY OF THERMAL CONTACT PROCESSES GIDROFRIKTSIONNOM VIBRATION DAMPERS FOR HIGH SPEED ELECTRIC ROLLING

Fayzibaev Sherzod Sabirovich
Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.
Dr. Sci. Tech., professor, chief on science and preparing the scientifically – pedagogical personnel of TashIET.
Phone: (8-109-98-71) 299-00-06.
E-mail: icenter@tashiit.uz

Chromova Galina Alekseevna
Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.
Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electrical transport and high-speed of electric composition», TashIET.
Phone: (8-109-98-71) 293-59-53.
E-mail: psion2@sarkor.uz

Mahamadalieva Malika Alievna
Tashkent institute of railway transport engineering (TashIET).
1, Adilhodjaev str., Tashkent, Mirobad region, 100167, Republik of Uzbekistan.
Student of TashIET.
Phone: (8-109-98-71) 293-59-53.
E-mail: reine_m@mail.ru

The article proposes a numerical-analytical method based on the boundary element method (Method of Boundary Elements Technology), which used to assess of change patterns of temperature fields in the working fluid in hydro-friction vibration damper telescopic view when the ambient temperature changes. This method takes into account the physico-mechanical properties of the working fluid and the effect of corrosion pouring temperature, ambient temperature, the speed of electric rolling stock and the working liquid filling height.

Keywords: *analysis, gidrofriktsionny damper, damper, isothermal-cal lines, three-dimensional model.*

УДК 621.315:621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГИРЛЯНДАХ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Кузнецов Андрей Альбертович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.
E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Кузьменко Антон Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Инженер кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.
Тел.: 8-923-672-00-17
E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

Кротенко Евгений Александрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
E-mail: k66.08@mail.ru

В статье рассмотрены основные виды повреждений изоляторов контактной сети, приведена статистика по их отказам. Выявленные недостатки в существующих методах диагностирования говорят об актуальности проблемы, особенно на участках железных дорог постоянного тока. Произведены экспериментальные исследования по измерению напряженности электростатического поля на гирляндах изоляторов. Анализ проведенных исследований показал, что наличие в гирлянде неисправных изоляторов приводит к увеличению напряженности электростатического поля вокруг них.

Предложены техническое устройство бесконтактного измерения электростатического поля и методика определения неисправного изолятора в гирлянде.

Ключевые слова: *контактная сеть, постоянный ток, гирлянда изоляторов, электростатическое поле, бесконтактный метод диагностирования.*

INVESTIGATION OF ELECTROSTATIC FIELD ON THE INSULATOR STRINGS CATENARY

Kuznetsov Andrey Albertovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Tech. Sci., professor of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: (3812) 31-06-88.
E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Kuzmenko Anton Yurievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The engineer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.
Phone: 8-923-672-00-17.
E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

Krotenko Evgeniy Alexandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., the senior lecturer of the department «Power supply of Railroad Transport», OSTU.
E-mail: k66.08@mail.ru

The article describes the main types of damage insulators contact network, presents statistics for their failures. Identified weaknesses in existing methods of diagnosing say about the relevance of the problem, especially in the areas of railways DC. Made experimental investigations on the measurement of the electrostatic field on the insulator strings. Analysis of the studies showed that the presence in the string of faulty insulators leads to an increase in the electrostatic field around them.

Proposed a technical device noncontact measurement of electrostatic field and method of determining the faulty insulator in the string.

Keywords: *catenary, DC, insulator string, electrostatic field, noncontact method of diagnosis.*

УДК 621.311.001.57

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО КРИТЕРИЮ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Незевак Владислав Леонидович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: NezevakWL@mail.ru

Шатохин Андрей Петрович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант, инженер-проектировщик научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

Гателюк Олег Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

В статье рассматривается подход к оценке влияния на расход электроэнергии на тягу поездов параметров графика движения в условиях применения рекуперативного торможения. Поиск варианта с минимальным потреблением энергии основан на моделировании графика движения при различных межпоездных интервалах в условиях организации пакетного обращения поездов на участке железной дороги. По результатам моделирования предлагается представить полученную зависимость изменения расхода электроэнергии от параметров графика движения поездов в виде аналитической функции нескольких переменных n-го порядка для последующего применения при построении нормативных графиков движения с целью сокращения расхода электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова: *график движения, межпоездной интервал, расход электроэнергии на тягу поездов, ограничения инфраструктуры, моделирование работы системы тягового электроснабжения, рекуперативное торможение, целевая функция, уравнение регрессии.*

OPTIMIZATION OF GRAPHIC TIME-TABLE TO THE CRITERION OF ELECTRICAL ENERGY'S EXPENDITURE FOR TRACTION ON THE RAILWAYS SECTIONS IN THE CONDITIONS OF USING THE REGENERATIVE BRAKING

Nezevak Vladislav Leonidovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor, senior staff scientist of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: NezevakWL@mail.ru

Shatokhin Andrew Petrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student, designing engineer of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

Gatelyuk Oleg Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Higher mathematics», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: GatelukOV@omgups.ru

A method to an assessment of influence on the expenditure of electrical energy for traction of trains, parameters of graphic time-table in the conditions of using the regenerative braking is being considered in the article. The retrieval of version with the minimal using of energy is based on the modeling of graphic time-table by different train-to-train intervals in the conditions of burst-mode access' organization on the railway section. By results of modeling it is proposed to represent the derived dependence by changing of electrical energy's expenditure on parameters of graphic time-table in the form of analytic function of several variables n-order for the following using by normative plotting of movement for the purpose of curtailing electrical energy's expenditure for traction on the trains.

Keywords: *the graphic time-table, the train-to-train intervals, the electrical energy's expenditure for traction on the trains, the limitations of infrastructure, the system operation's modeling of tractive electricity supply, the regenerative braking, the objective function, the regression.*

УДК 621.331:621.311

КОНТРОЛЬ НЕРАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Черемисин Василий Титович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, зав. кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.
E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Ушаков Сергей Юрьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЧ, ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: ushakovsj@gmail.com

Истомин Станислав Геннадьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: istomin_sg@mail.ru

В статье рассмотрены виды непроизводительных потерь электроэнергии в электротяге и даны плановые уровни их улучшения. Приведены основные способы определения непроизводительных потерь, которые применяются в настоящее время в ОАО «РЖД». Показан пример алгоритма определения непроизводительных потерь при нагоне графикового времени и дано его описание. Сформулированы технические результаты предлагаемого способа определения непроизводительных потерь.

Ключевые слова: *непроизводительные потери электроэнергии, электроподвижной состав, информационно-измерительные комплексы, автоматизированная система учета электроэнергии, мониторинг энергоэффективности перевозочного процесса.*

CONTROLLING THE IRRATIONAL ELECTRICITY CONSUMPTION FOR TRAIN TRACTION BY THE USE OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS OF ELECTRICITY METERING ON THE ROLLING STOCK

Cheremisin Vasiliy Titovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, director of energy research Institute of railway transport, head of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 31-34-19.
E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Ushakov Sergey Yurjevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., senior researcher of research sector, OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: ushakovsj@gmail.com

Istomin Stanislav Gennadevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: istomin_sg@mail.ru

The article describes the types of irrational electric power losses for train traction and sets the annual planning levels of their improvement. Represented the basic methods of irrational electric power losses determination which are currently used in JSC "Russian Railways". Shown an example of the irrational losses determining algorithm in case of making up for train delay and given its description. Formulated technical results of the proposed method for determining the irrational electric power losses.

Keywords: *irrational electric power losses, rolling stock, information-measuring complexes, automatic electric power measuring system, traction process efficiency monitoring.*

УДК 004.932

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА «ВЫДЕЛЕНИЯ ФОНА» ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Зачатейский Николай Дмитриевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: nzachateyskiy@gmail.com

Аржанников Андрей Андреевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: a.a.arzhannikov@gmail.com

Альтман Евгений Анатольевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.
E-mail: altmanea@gmail.com

В статье описаны подходы по извлечению из видеоряда областей, относящихся к подвижным объектам, которые могут являться причиной возникновения опасной ситуации на железнодорожном переезде. Предлагаемый подход позволит улучшить качество выделения подвижного объекта, что даст возможность сократить время обработки изображения для идентификации подвижных объектов, с целью определения степени риска. Для оценки качества алгоритмов было проведено моделирование в разработанном программном продукте.

Ключевые слова: *видеоряд, анализ движения, железнодорожный переезд, область интереса.*

IMPROVEMENT OF METHODS OF «BACKGROUND SUBTRACTION» FOR SEARCHING MOVING OBJECTS AT RAILWAY CROSSINGS THROUGH COMPUTER VISION

Zachateyskiy Nikolay Dmitrievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: nzachateyskiy@gmail.com

Arzhannikov Andrei Andreevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
The post-graduate student of the department «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: a.a.arzhannikov@gmail.com

Altman Eugene Anatolievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the department «Automatics and control systems», OSTU
Phone: (3812) 31-05-89.
E-mail: altmanea@gmail.com

This article describes the approaches to extract from the video sequence of areas relating to movable objects, which may cause a dangerous situation at a railway crossing. The proposed approach will improve the quality of the mobile object allocation, which will reduce the time image processing to identify moving objects in order to determine the degree of risk. To assess the quality of algorithms was develop a software product and simulated motion capture.

Keywords: *video, motion analysis, railway crossing, the region of interest.*

УДК 004.93

РАЗГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СКРЫТОГО МОНИТОРИНГА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ: ПОРТРЕТ НЕЛОЯЛЬНОГО СОТРУДНИКА

Сулавко Алексей Евгеньевич
Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
644050, г. Омск, пр. Мира, 11.
Кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Комплексная защита информации», ОмГТУ.
E-mail: sulavich@mail.ru

Еременко Александр Валериевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.
E-mail: nexus-@mail.ru

Левитская Елена Андреевна
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики (РФЯЦ – ВНИИТФ).
456770, г. Снежинск, ул. Васильева, 13.
Инженер-исследователь, РФЯЦ – ВНИИТФ.
E-mail: Laska_kb@mail.ru

Работа посвящена проверке истинности гипотезы о том, что информация о действиях пользователя в компьютерной системе, полученная на основе скрытого мониторинга стандартных периферийных устройств, позволит своевременно распознать нелояльное поведение и предотвратить реализацию внутренней угрозы информационной безопасности, что актуально для информационных систем железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: *скрытый мониторинг, клавиатурный почерк, биометрическая идентификация, особенности работы с мышью, портрет работы пользователя в компьютерной системе.*

AN APPROACH TO INFORMATION ACCESS CONTROL BASED ON HIDDEN MONITORING OF COMPUTER SYSTEM USERS: PORTRAIT DISLOYAL EMPLOYEES

Sulavko Alexey Evgenievich
Omsk State Technical University (OmSTU).
11, Mira av., Omsk, 644050, Russia.
Ph. D., researcher of the department «Integrated data protection», OmSTU.
E-mail: sulavich@mail.ru

Eremenko Alexander Valeriyovych
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», OSTU
E-mail: nexus-@mail.ru

Levitskaya Elena Andreevna
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics (RFNC – ARITP).
13, Vasilyeva str., Snezhinsk, 456770, Russia.
Research engineer, RFNC – ARITP.
E-mail: Laska_kb@mail.ru

The article is devoted to checking the validity of the hypothesis that the information on a user's computer system, obtained on the basis of covert monitoring of standard peripherals allow timely recognize disloyal behavior and prevent the realization of the internal threats to information security, which is important for the information systems of rail transport.

Keywords: *hidden monitoring, keyboard handwriting, biometric identification, especially the work with the mouse, a portrait of the user in a computer system.*

УДК 004.083

ИГРОВЫЕ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Шахов Владимир Григорьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

Морозов Антон Валерьевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
E-mail: morozav89@mail.ru
Тел.: (3812) 31-05-89.

Тиунов Артем Павлович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

Громов Андрей Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Соискатель кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

В статье изложены принципы количественного оценивания информационной безопасности с позиций теории игр. Введены определения игровой матрицы и ее количественной интерпретации. Представлены практически реализуемые методики анализа, планирования и проектирования информационной безопасности на основе предложенных моделей.

Ключевые слова: *информационная безопасности, теория игр, топология информационной системы, моделирование, платежная матрица.*

GAMING AND TOPOLOGICAL MODELS OF INFORMATION SECURITY

Shakhov Vladimir Grigoryevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., professor of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

Morozov Anton Valeryevich
Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
E-mail: morozav89@mail.ru
Phone: (3812) 31-05-89.

Tiunov Artem Pavlovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

Gromov Andrey Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Post-graduate student of the departament «Automatics and control systems», OSTU.
Phone: (3812) 31-05-89.

The article outlines the principles of quantitative evaluation of information security from the viewpoint of the theory of games. Definitions of the game matrix and its quantitative interpretation. Offered practically implemented method of analysis, planning and design of information security based on the proposed models.

Keywords: *information security, game theory, and topology information system, modeling, payoff matrix.*

УДК 691.795.2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЛЬСОВ

Аксенов Владимир Алексеевич
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», МИИТ.

Матафонов Алексей Валерьевич
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», СГУПС.
Тел.: 8-953-769-08-49.
E-mail: asi@stu.ru

Ильиных Андрей Степанович
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», СГУПС.
Тел.: 8-913-017-28-08.
E-mail: asi@stu.ru

Рассмотрено влияние надежности технологического процесса шлифования рельсов при обеспечении параметров качества обработанной поверхности. Приведены результаты анализа взаимосвязи параметров качества шлифования рельсов с условиями их обработки. Рассмотрены факторы, влияющие на надежность технологической системы. Приведена модель определения надежности технологического процесса шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути. Представлен алгоритм расчета параметров надежности технологической системы рельсошлифования. Рассмотрено формирование показателей качества в процессе осуществления технологического процесса шлифования рельсов.

Ключевые слова: *надежность, технологический процесс, качество поверхности, технологическая система.*

BUILDING SIMULATION MODEL THE REQUIRED QUALITY PARAMETERS AT RAIL GRINDING

Aksenov Vladimir Alekseevich
Moscow State Transport University (MSTU).
9/9, Obrazcova st., Moscow, 127994, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Technosphere safety», MSTU.

Matafonov Aleksey Valeryevich
Siberian Transport University (STU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Post-graduate student of the department «Technology transport engineering and operation of machines», STU.
Phone: 8-953-769-08-49.
E-mail: asi@stu.ru

Ilinykh Andrey Stepanovich
Siberian Transport University (STU).
191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Technology transport engineering and operation of machines», STU.
Phone: 8-952-901-91-02.
E-mail: asi@stu.ru

It is considered how reliability of the grinding technology influences on the quality parameters of the treated surface. The results of analysis of relationship between quality of the rails grinding and conditions of its treatment are represented. Factors affecting on reliability of the technology are reviewed also. The model determining the reliability of the rails grinding technology in the railway is represented. Also the algorithm of calculation of the grinding technology reliability is represented. It's reviewed how the quality parameters are formed during the rails grinding.

Keywords: *reliability; manufacturing process; score quality; technological system.*

УДК 656.078.12

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА

Белов Александр Анатольевич
Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого.

142210, Московская область, г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17.
Кандидат технических наук, начальник кафедры «Эксплуатация ракетных комплексов».
E-mail: belloww@rambler.ru

Ларин Андрей Николаевич
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистики и управления качеством», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-48.
E-mail: larinan75@mail.ru

В статье рассматривается задача определения длины очереди составов, суммарной грузоподъемности транспорта, не обеспеченного грузом, количество груза, находящегося в момент времени на складе транспортного узла, с учетом стохастически независимых встречных пуассоновского и квазипуассоновского транспортных потоков. Задача решена с использованием математического аппарата теории массового обслуживания. Полученные результаты могут быть использованы для определения оптимальных значений складских емкостей и технологического запаса груза транспортного узла при заданном грузообороте.

Ключевые слова: *транспортный узел, транспортный поток, грузооборот, емкость склада, длина очереди, погрузочно-разгрузочные работы.*

ASSESSMENT OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TRANSPORT KNOT

Belov Aleksandr Anatolyevich
Military Academy of strategic missile forces named after Peter the Great.
17, st. Brigadnaya, Moscow region, Serpukhov, 142210, Russia.
Ph. D., head of the department «Operation of rocket complexes».
E-mail: belloww@rambler.ru

Larin Andrey Nikolaevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Ph. D., associate professor of the departament «Economics of transport, logistics and quality management» (OSTU).
Tel.: (3812) 31-06-48.
E-mail: larinan75@mail.ru

In article the problem of determination of length of turn of structures, the total loading capacity of the transport which isn't provided with freight, quantity of freight of the transport knot which is in a timepoint in a warehouse on the basis of definition of distribution of a random variable of the freight expecting loading or unloading, and also the free capacity of vehicles taking into account restrictions on the capacity of warehouses is considered. During the solution of a task the following assumptions are accepted: capacity of cargo handling devices of transport knot isn't limited; time of the translation of giving of cars for the pogruzoch-but-unloading front and back isn't considered. The structure is understood as conditional structure which loading capacity is equal to the total loading capacity of some party of real structures, and the moment of its arrival – to the arrival moment on transport knot of the last of them. The received results can be used for determination of op-

timum values of warehouse capacities and a technological stock of freight of transport knot at the set goods turnover.

Keywords: *transport knot, transport stream, goods turnover, warehouse capacity, turn length, loading and unloading works.*

УДК 629.488

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕМОНТА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Евсеев Дмитрий Геннадьевич
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Доктор технических наук, профессор, президент Института транспортной техники и систем управления (ИТТСУ) МИИТа.
Тел.: (495) 681-29-13.
E-mail: evseevdg@gmail.com

Мелихов Александр Викторович
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», МИИТ.
Тел.: +7 926 406-61-42.
E-mail: las-vegas.ru@mail.ru

В статье предложена новая методика, позволяющая определить уровень качества ремонта для любого отчетного периода в течение межремонтной эксплуатации. Приведен тестовый пример оценки качества деповского ремонта пассажирских вагонов.

Ключевые слова: *оценка качества ремонта, показатели качества, деповской ремонт.*

THE EVALUATION OF THE REPAIR QUALITY OF COACHES

Evseev Dmitriy Gennadievich
Moscow State Transport University (MSTU).
9/9, Obrazcova st., Moscow, 127994, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor, the president of institution of transport engineering and executive systems (ITEES) MSTU.
Phone: (495) 681-29-13.
E-mail: evseevdg@gmail.com

Melikhov Alexander Viktorovich
Moscow State Transport University (MSTU).
9/9, Obrazcova st., Moscow, 127994, Russia.
Post-graduate student of the department «The technology of mechanical engineering and the repair of rolling-stock», MSTU.
Phone: +7 926 406-61-42.
E-mail: las-vegas.ru@mail.ru

This article proposed a new method that determines the level of repair quality for any accounting period during the overhaul exploitation. A test example of depot repair quality of coaches is given.

Keywords: *the evaluation of the repair quality, the index of quality, depot repair*.

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 журнала представляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, 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 (5 – 10 слов), 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 на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

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 алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

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.

Редколлегия оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

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, НПЦ «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. Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
21. Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
22. Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., профессор, ОмГУПС (Омск).

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. Kharlamov Viktor Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
21. Chetvergov Vitaly Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
22. Shpaltakov Vladimir Petrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).

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 26.03.2015.
Тираж 500 экз.

