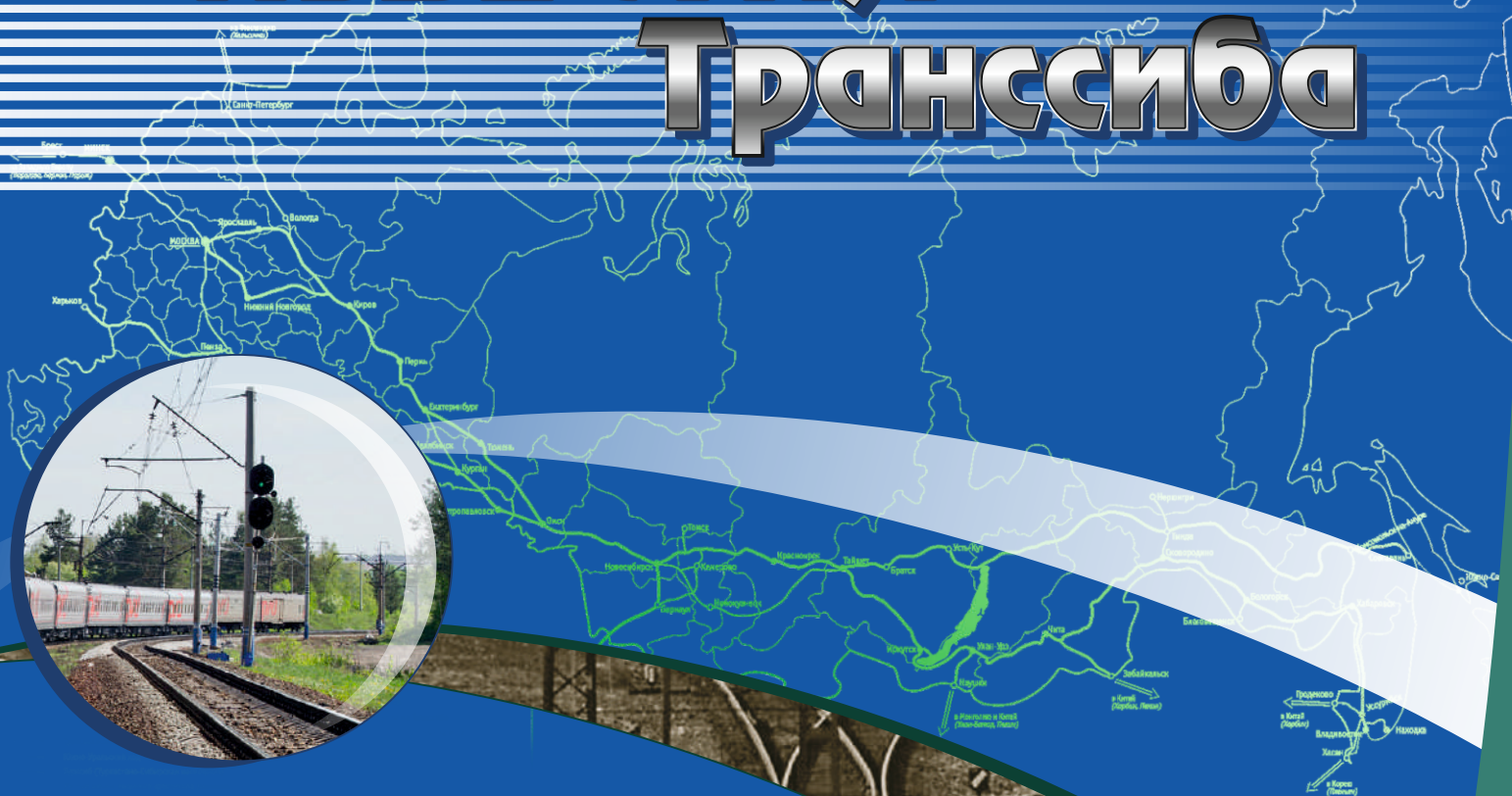


ИЗВЕСТИЯ

№ 1(33)

2018

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Демин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТА, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н. профессор (Омск).
11. Каргапольцев Сергей Константинович – первый проректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
17. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТА, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

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. Bokaryov Sergey Alexandrovich – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Demin Yuri Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Kargapol'tsev Sergey Konstantinovich – vice-rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
14. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
16. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATK, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
18. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
19. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Бакланов А. А. Влияние скорости движения на энергозатраты грузовых поездов 2
- Буйносов А. П., Федоров Е. В. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава 13
- Истомин С. Г., Бондаревский Д. И. Применение регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 22
- Калиева С. Т., Панченко В. Н. Анализ современных методов технической диагностики, применяемых для контроля топливной аппаратуры дизеля локомотива 30
- Коропец П. А., Хачкина С. А., Кашуба А. В. Динамические процессы в тяговом приводе электровоза ЭП20 в режиме боксования 38
- Матяш Ю. И., Гаджиев И. А. Совершенствование устройства электропитания для бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона на ходу поезда 48
- Минаков В. А., Сорокина М. А. Повышение качества очистки моторного масла дизелей локомотивов 55
- Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю. Использование переходных режимов при диагностировании ответственных узлов подвижного состава 62

Транспортная энергетика

- Голубков А. С., Ермачков Г. Р., Сидоров О. А., Смердин А. Н. Применение нейронных сетей при моделировании системы токосъема на электрифицированных железных дорогах 69
- Каштанов А. Л., Ананьева Н. Г. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов. Проблемы и пути их решения 79
- Никифоров М. М., Вильгельм А. С., Сергеев Р. В. Применение индикаторов энергетической эффективности электровозов для оптимизации использования тяговых ресурсов 88
- Осипова В. Э., Яковлев Д. А. Применение математического аппарата продукционной модели управления энергетическим комплексом предприятия на основе нечеткой логики 98
- Тарута В. Ф., Чулков А. В., Милютин Л. В. Технология контроля уровня мощности для настройки дизель-генераторной установки маневрового тепловоза с учетом условий эксплуатации 109

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Петрова Л. С., Крюкова Я. В. Математическое моделирование процессов высокоинтенсивного нагрева тел с покрытиями при обработке поверхности лазерным излучением 118

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Король Р. Г., Дороничев А. В. Обоснование целесообразности создания «сухипровтов» для эффективного функционирования дальневосточных транспортных узлов 130
- Соколов М. М. Построение безусловного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты 139

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения»
(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.423:629.4.016.1/5

А. А. Бакланов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В статье рассмотрены мгновенная и средние скорости движения поездов, их особенности и применение, в том числе для определения скоростных коэффициентов и времени движения. Показано определение степени влияния скорости движения и ее ограничений, остановок и задержек на потери времени хода и энергетические затраты на тягу груженных и порожних поездов. Приведена оценка экономии времени хода и электроэнергии за счет применения рекуперативного торможения электровозов. Предложена разработка рекомендаций по повышению средней скорости движения, сокращению времени хода и энергозатрат грузовых поездов.

Ключевые слова: средняя скорость движения, скоростные коэффициенты, время движения, ограничения скорости, расход электроэнергии, рекуперативное торможение.

Alexander A. Baklanov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

INFLUENCE OF SPEED ON ENERGY CONSUMPTION OF FREIGHT TRAINS

Annotation: Investigation of instantaneous and average velocities of train movement, their properties and their application, including calculation of speed coefficients and movement time. Determination of influence of the movement speed and its restrictions, stops and delays onto travel time losses and traction energy consumptions of loaded and empty trains. Time and energy saving estimation due to the application of regenerative braking on the electric locomotive. Development of the recommendations for increasing average speed, decreasing travel time and energy consumption of freight trains.

Keywords: average speed, speed coefficients, movement time, speed limits, energy consumption, regenerative braking.

Скорость движения является одним из важнейших показателей, определяющих время хода, энергозатраты поездов, пропускную способность железных дорог и, в конечном итоге, эффективность перевозочного процесса [1, 2]. Она зависит от многих факторов и может рассматриваться в виде мгновенной V и средней V_t величин. Мгновенная скорость движения практически используется в основном для контроля правильности режима и безопасности движения поезда. От средней скорости движения, как известно, зависит время хода поезда, которое на участке пути длиной L характеризуется формулой $T = L / V_t$, при этом средняя скорость может учитывать остановки и задержки поезда.

Разумеется, средняя скорость определяется мгновенной скоростью и продолжительностью ее реализации, в том числе максимальной скоростью движения V_{max} , которые для каждого участка железной дороги зависят от сочетания основных параметров и состояния технических средств (пути, искусственных сооружений, подвижного состава, системы электрооборудования, сигнализации и связи и др.). Следовательно, на мгновенную и среднюю скорости движения, а также время хода поезда влияют многие факторы: масса и длина поезда, параметры локомотива, профиля и плана пути участка, техническое состояние подвижного состава и инфраструктуры, условия движения, метеорологические факторы и др. Для сокращения времени хода поезда на участке требуется увеличение средней скорости движения, которого можно достигнуть путем увеличения максимальной скорости V_{max} либо за счет уменьшения количества и продолжительности остановок и задержек поезда.

Время хода, пройденный путь и средняя скорость движения поезда связаны универсальной зависимостью, представленной на рисунке 1, которая характеризует затраты времени на прохождение 1 км пути при какой-либо средней скорости движения. Анализ зависимостей времени хода поезда T от средней скорости движения V_t , приведенных на рисунках 1, 2, показывает, что при средней скорости движения ниже 50 ... 60 км/ч время хода поезда существенно возрастает, особенно на участках длиной 200 км и более. В зоне больших скоростей время хода поезда сокращается в меньшей степени.

В настоящее время на большинстве участков сети железных дорог максимальная скорость движения $V_{\max}$ для грузовых поездов установлена 80 км/ч, однако на некоторых участках ее повышают до 90 ... 100 км/ч, при этом экономия времени согласно графикам, представленным на рисунках 1, 2, составляет 11 ... 20 %. Разумеется, на полигонах большой длины такое сокращение времени хода можно получить только в случае, если повышение скорости движения поездов будет реализовано на всем полигоне. Кроме того, ранее проведенные исследования показывают, что сокращение времени хода поездов при увеличении максимальной скорости движения вначале получается значительное, а затем постепенно уменьшается [1].

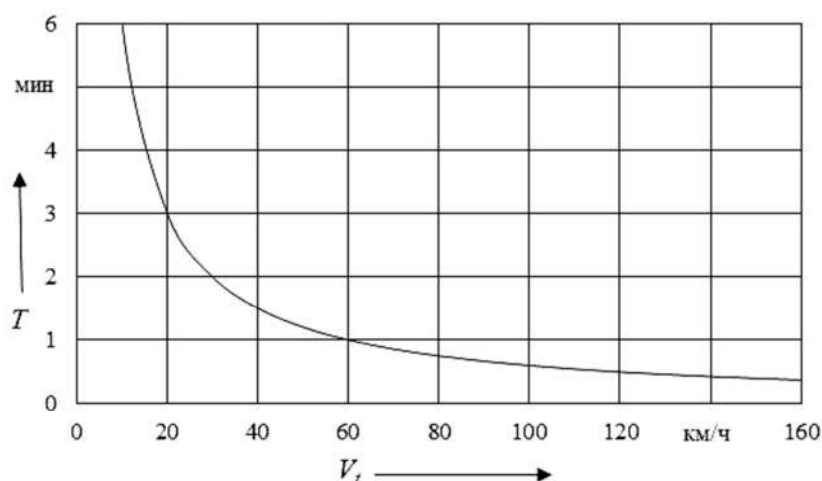


Рисунок 1 – Затраты времени поездом на прохождение 1 км пути

Из анализа кривых на рисунке 2 видно также, что, например, за время $T = 8$ ч локомотивная бригада может провести поезд на участках длиной $L = 100, 200, 300, 400, 500, 600$ км при средней скорости движения соответственно $V_t = 12,5; 25; 37,5; 50; 62,5; 75$ км/ч. Следовательно, реализация таких средних скоростей при максимальной скорости движения грузовых поездов 80 ... 100 км/ч позволяет иметь тяговые плечи, на которых работают локомотивные бригады, длиной до 500 ... 600 км.

В числе основных показателей работы локомотивов и в целом железнодорожного транспорта различают следующие средние скорости, которые определяют по формулам, приведенным в нормативно-справочной и учебной литературе [3 – 10], путем деления суммарного пробега в локомотиво-км или поезд-км на соответствующее суммарное время в локомотиво-ч или поезд-ч:

ходовая V_x – средняя скорость безостановочного движения поезда без учета времени на разгоны и замедления и стоянок на станциях;

техническая V_t – средняя скорость без учета времени стоянок на промежуточных станциях, но с учетом времени на замедления и разгоны поезда при остановках;

участковая V_y – средняя скорость с учетом времени остановок поезда на промежуточных станциях и перегонах;

маршрутная V_m – средняя скорость с учетом времени всех остановок между станциями формирования и расформирования поезда.

В числе эксплуатационных показателей используют также коэффициент участковой скорости, равный отношению участковой скорости к технической, т. е. $\beta_y = V_y / V_T$, но для других скоростей подобные коэффициенты в литературе не рассматриваются. Поэтому для оценки соотношений других скоростей введем коэффициенты ходовой скорости β_x , технической скорости β_T , маршрутной скорости β_M . В результате получаем формулы для определения скоростных коэффициентов и средних скоростей, которые приведены в таблице 1. Следует отметить, что эти формулы взаимно связаны и позволяют находить скоростные и временные показатели движения поездов, оценивать эффективность различных мероприятий по повышению скорости движения поездов и т. п.

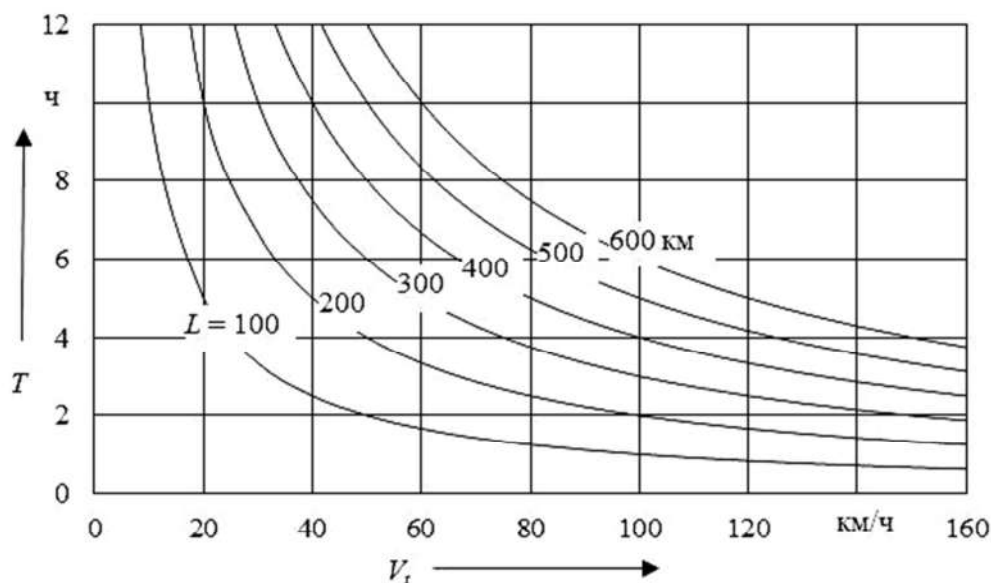


Рисунок 2 – Время хода поезда на участках разной длины

Таблица 1 – Формулы для определения скоростных коэффициентов и средних скоростей

Скоростные коэффициенты	Средние скорости
$\beta_x = V_x / V_{\max}$	$V_x = V_{\max} \beta_x$
$\beta_T = V_T / V_x$	$V_T = V_x \beta_T = V_{\max} \beta_x \beta_T$
$\beta_y = V_y / V_T$	$V_y = V_T \beta_y = V_x \beta_T \beta_y = V_{\max} \beta_x \beta_T \beta_y$
$\beta_M = V_M / V_y$	$V_M = V_y \beta_M = V_T \beta_y \beta_M = V_x \beta_T \beta_y \beta_M = V_{\max} \beta_x \beta_T \beta_y \beta_M$

С помощью полученных формул оценим скоростные и временные показатели движения транзитных грузовых поездов на Транссибирской магистрали (ТСМ) протяженностью $L = 9300$ км (таблица 2). Из анализа отчетных данных следует, что на железных дорогах ТСМ коэффициент участковой скорости находится в основном в диапазоне $\beta_y = 0,8 \dots 0,9$. Разумеется, другие скоростные коэффициенты имеют свои значения, однако с целью упрощения расчетов можно принять средние значения всех скоростных коэффициентов одинаковыми.

Тогда в первом варианте при $\beta_x = \beta_T = \beta_y = \beta_M = 0,8$ и максимальной скорости движения $V_{\max} = 80$ км/ч получим следующие средние скорости: $V_x = 80 \cdot 0,8 = 64,0$ км/ч; $V_T = 80 \cdot 0,8^2 = 51,2$ км/ч; $V_y = 80 \cdot 0,8^3 = 41,0$ км/ч; $V_M = 80 \cdot 0,8^4 = 32,8$ км/ч. При этом время хода поездов на ТСМ составит $T = 9300 / 32,8 = 283,5$ ч = 11,8 сут. Аналогично выполним расчеты при максимальной скорости движения $V_{\max} = 90$ км/ч и скоростных коэффициентах $\beta_x = \beta_T = \beta_y = \beta_M = 0,9$. Результаты расчетов для четырех вариантов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные скоростные и временные показатели движения транзитных грузовых поездов на Транссибирской магистрали

Вариант	β	$V_{\max}$, км/ч	V_x , км/ч	V_t , км/ч	V_y , км/ч	V_m , км/ч	Т	
							ч	сут
1	0,8	80	64,0	51,2	41,0	32,8	283,5	11,8
2	0,8	90	72,0	57,6	46,1	36,9	252,3	10,5
3	0,9	80	72,0	64,8	58,3	52,5	177,2	7,4
4	0,9	90	81,0	72,9	65,6	59,0	157,5	6,6

Анализ полученных данных показывает следующее. Из сравнения вариантов 1 и 2 видно, что при неизменной технологии перевозочного процесса, характеризуемой в определенной степени скоростными коэффициентами β , и повышении максимальной скорости движения транзитных грузовых поездов на всем протяжении ТСМ с 80 до 90 км/ч сокращение их времени хода составит 1,3 сут, или 11,0 %. Аналогичный вывод получается при сравнении вариантов 3 и 4.

Сопоставление вариантов 1 и 3 показывает, что за счет усовершенствования технологии перевозочного процесса путем сокращения количества и продолжительности остановок поездов и других мероприятий можно повысить скоростные коэффициенты в среднем до $\beta = 0,9$ и при максимальной скорости движения поездов 80 существенно увеличить средние скорости, а также уменьшить время хода транзитных грузовых поездов на ТСМ до 7,4 сут, т. е. на 4,4 сут, или на 37,3 %. Такой же вывод получается при сопоставлении вариантов 2 и 4.

Сравнивая варианты 2 и 3, можно сказать, что предпочтительнее увеличивать среднюю скорость и уменьшать время хода поездов не за счет увеличения максимальной скорости движения, а путем сокращения количества и продолжительности остановок и задержек. Такой подход выгоднее и с точки зрения снижения энергозатрат на тягу поездов.

Результаты вариантов 3 и 4 подтверждаются фактическими данными экспериментального пропуска контейнерного поезда по ТСМ из Находки в Москву за 7 сут в мае 2013 г. [11]. Следовательно, на ТСМ имеется реальная возможность существенно сократить время хода транзитных грузовых поездов и довести его до 7 сут за счет усовершенствования технологии перевозочного процесса путем сокращения количества и продолжительности остановок поездов и других мероприятий. Это значительно повысит конкурентоспособность железнодорожного транспорта по сравнению с другими видами транспорта, прежде всего с морским транспортом, который доставляет контейнеры из стран Юго-Восточной Азии в страны Евросоюза примерно за месяц.

На среднюю скорость движения и время хода поезда существенное влияние оказывают ограничения скорости, остановки и задержки в пути следования. В качестве примера на рисунке 3 приведены полученные путем тяговых расчетов [12, 13] и взятые из источника [15] кривые потерь времени от ограничений скорости движения поезда на участке длиной 1500 м, равной сумме длин поезда и участка с ограничением скорости. Замедление поезда при механическом торможении перед ограничением скорости принято $0,25 \text{ м/с}^2$, а ускорение при разгоне после ограничения скорости – $0,1 \text{ м/с}^2$. Прямая линия на рисунке 3 характеризует потери времени на разгон и замедление при остановке поезда без учета продолжительности стоянки.

Анализ представленных зависимостей показывает, что при увеличении графической скорости движения V_r , под которой понимается установленная перегонная скорость, потери времени $T_{o.c}$ от ограничений скорости возрастают, причем при $V_r > 80 \text{ км/ч}$ зависимости $T_{o.c}(V_r)$ становятся практически линейными. Чем выше ограничение скорости движения V_o , тем меньше потери времени на его преодоление и наоборот. Наибольшие потери времени вызывают ограничения скорости 15...25 км/ч. Относительное увеличение времени хода поезда на участке от ограничений скорости движения характеризуется коэффициентом β_r , рас-

считанным при относительной протяженности участка с ограниченной скоростью движения, равной 0,1, и представленным в виде зависимостей $\beta_t(V_r)$ на рисунке 4.

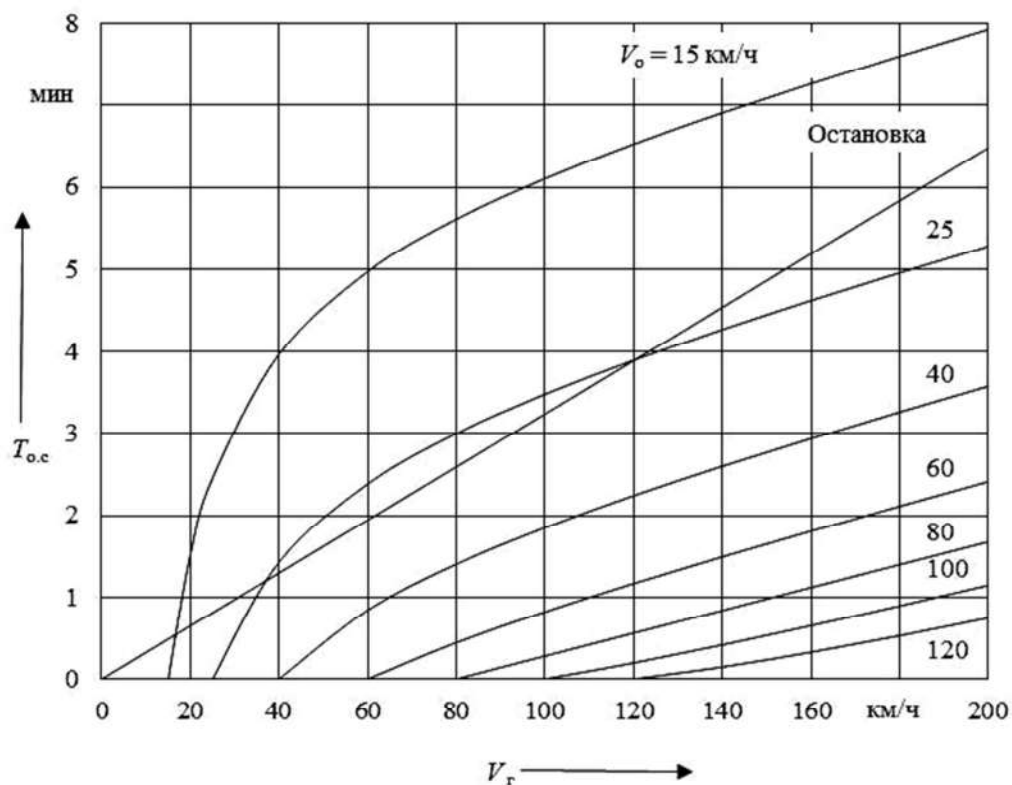


Рисунок 3 – Потери времени от ограничений скорости движения поезда

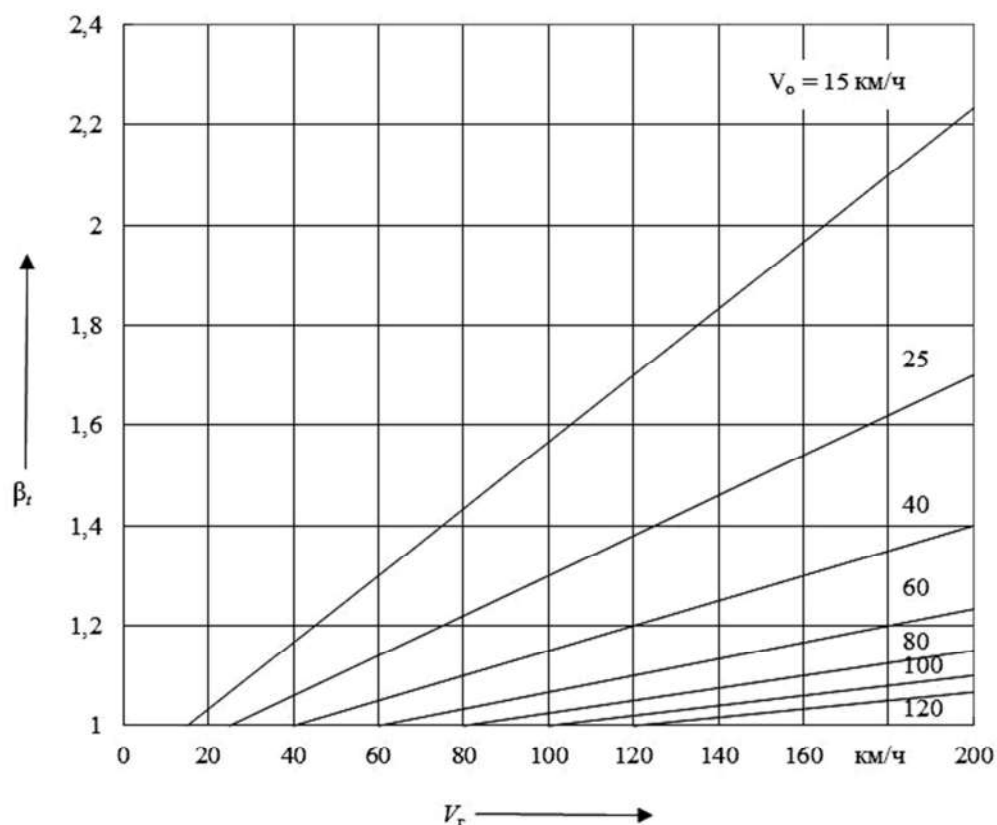


Рисунок 4 – Коэффициент увеличения времени хода поезда на участке за счет ограничений скорости движения

Рассмотрим влияние скорости движения на энергозатраты поездов. От скорости движения, как известно, зависит реализуемая мощность электровоза, которая возрастает с увеличением скорости, при этом, как правило, возрастает и расход электроэнергии на тягу. Существенное влияние на энергозатраты оказывает как мгновенная, так и средняя скорость движения поезда. Средняя скорость, характеризующая время хода поезда по участку, оказывает большее влияние на энергозатраты, однако мгновенная скорость, зависящая от колебаний скорости, также оказывает определенное влияние на энергозатраты.

Степень влияния скорости движения на энергозатраты разная для груженых и порожних грузовых поездов и разных электровозов. Расчеты, выполненные с использованием энергетического баланса движения поезда [14], показывают, что на участках с равнинным профилем пути при увеличении средней скорости движения V_t с 50 до 60 км/ч у груженого поезда массой $m_c = 6000$ т с количеством осей вагонов $n_{oc} = 300$ удельный расход электроэнергии на тягу a_3 возрастает на 7...10 %, а у порожнего поезда массой $m_c = 1800$ т с количеством осей вагонов $n_{oc} = 300$ – на 11...15 % (рисунки 5, 6).

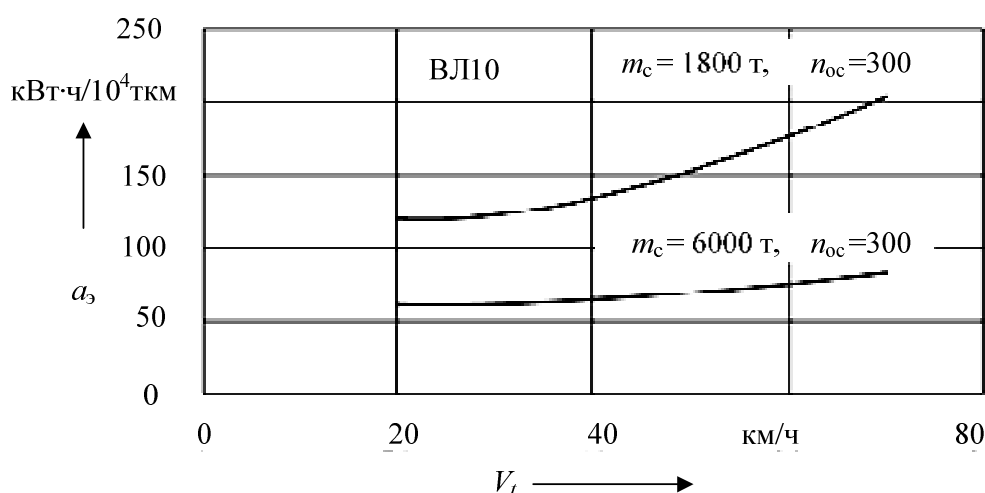


Рисунок 5 – Удельный расход электроэнергии электровоза постоянного тока ВЛ10 на тягу груженого и порожнего поездов на равнинном профиле пути

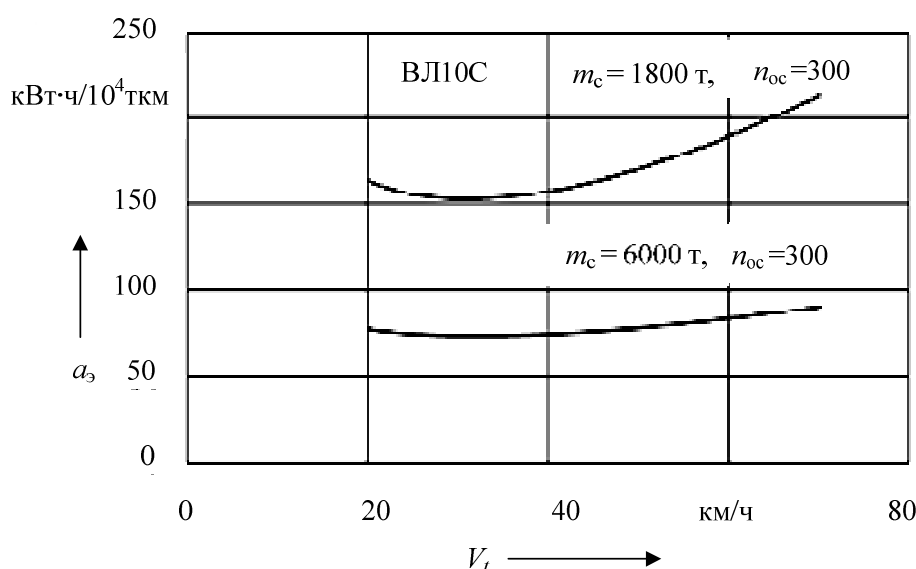


Рисунок 6 – Удельный расход электроэнергии электровоза переменного тока ВЛ10С на тягу груженого и порожнего поездов на равнинном профиле пути

Из сравнения зависимостей на рисунках 5, 6 видно, что при прочих равных условиях удельный расход электроэнергии электровоза переменного тока ВЛ80С выше, чем электровоза постоянного тока ВЛ10. Это связано с особенностями электрической схемы электровоза переменного тока ВЛ80С прежде всего с большей мощностью его собственных нужд и отсутствием рекуперативного торможения.

Скорость движения и связанные с ней энергозатраты существенно зависят от параметров поездов, тягового подвижного состава, профиля и плана пути, уровня технической оснащенности, технологии перевозочного процесса, организации движения поездов, метеорологических факторов и др.

Средняя скорость движения и соответственно время хода поездов в значительной степени зависят от ограничений скорости. Дополнительный расход электроэнергии на ограничения скорости $A_{o.c}$ (рисунок 7) при одной и той же графиковой скорости V_r тем больше, чем ниже ограничение скорости V_o .

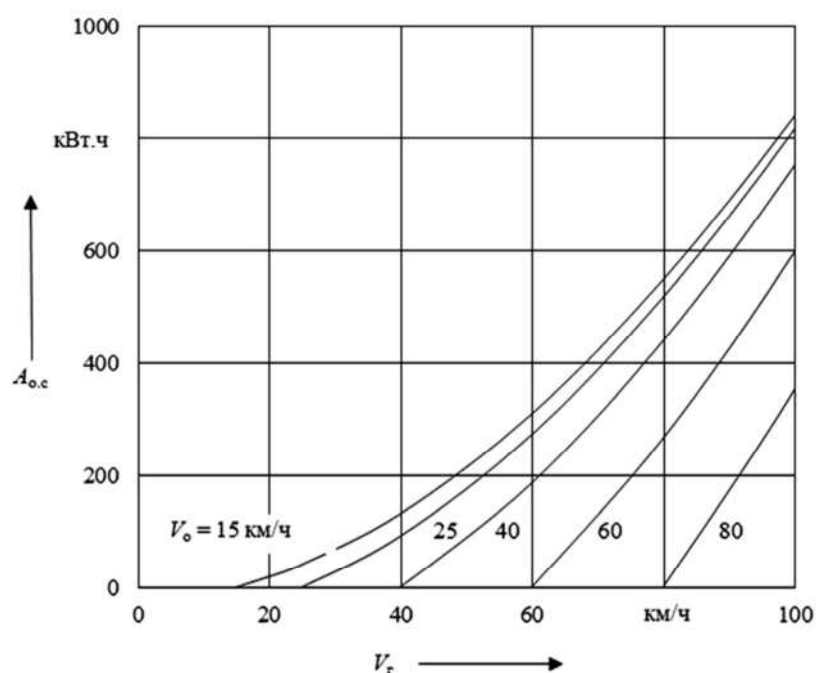


Рисунок 7 – Дополнительный расход электроэнергии на ограничения скорости движения грузового поезда массой 6000 т на участке длиной 500 м с равнинным профилем пути

Влияние ограничений скорости, остановок и задержек на расход электроэнергии подтверждается результатами опытных поездок тягово-энергетической лаборатории с грузовыми поездами на разных участках, приведенными в таблице 3. Масса состава вагонов в опытных поездках находилась в диапазоне 6221...6474 т, масса на ось вагона – в диапазоне 20,0...22,3 т, т. е. менялись незначительно, однако условия движения поездов существенно различались. В опытных поездках на тяговых плечах полигона Красноярск – Иркутск количество ограничений скорости 15 – 25 км/ч было сравнительно небольшим, но они имели место в основном на перегонах с лимитирующими подъемами крутизной 10 ‰.

Анализ полученных данных показывает, что на всех рассматриваемых участках при движении с ограничениями скорости 40 – 25 – 15 км/ч время хода поездов получается больше, средняя скорость движения меньше и расход электроэнергии выше, чем при движении без ограничений скорости.

Особенно примечательным является участок Московка – Ишим, на котором в зимний период года, несмотря на отрицательную температуру наружного воздуха, при благоприятных условиях движения без ограничений скорости расход электроэнергии на тягу получился ниже по сравнению с летним периодом года, когда в поездке было 22 ограничения скорости.

Таблица 3 – Результаты опытных поездок тягово-энергетической лаборатории с грузовыми поездами с остановками и без остановок

Серия электровоза	Участок, профиль пути, длина, км	Условия движения	$\frac{m_c}{m_{во}}$ т	$\frac{T_{общ}}{T_{чд}}$ ч. мин	$\frac{n_{ост}}{T_{ост}}$ ч. мин	V_t км/ч	A_z кВт·ч	a_z $\frac{кВт·ч}{10^4 \text{ ткм}}$	Температура наружного воздуха, °С
ВЛ80Р 3 секции	Красноярск – Иланская, холмистый, 250 км	СОС	$\frac{6263}{21,0}$	$\frac{5,24}{4,51}$	$\frac{2}{0,33}$	51,5	17650	112,7	–10...–12
		БОС	$\frac{6221}{20,0}$	$\frac{4,49}{4,49}$	-	51,9	15310	98,4	–16...–18
	Иланская – Нижнеудинск холмистый, 304 км	СОС	$\frac{6263}{21,0}$	$\frac{8,14}{7,41}$	$\frac{3}{0,33}$	39,6	21790	114,4	–12...–16
		БОС	$\frac{6221}{20,0}$	$\frac{9,23}{7,28}$	$\frac{3}{1,55}$	40,7	21260	112,4	–11...–13
	Нижнеудинск – Зима, холмистый, 254 км	СОС	$\frac{6263}{21,0}$	$\frac{5,04}{4,51}$	$\frac{1}{0,13}$	52,4	13820	86,8	–16...–18
		БОС	$\frac{6221}{20,0}$	$\frac{4,45}{4,45}$	-	53,5	12240	77,3	–11...–13
	Зима – Иркутск, холмистый, 244 км	СОС	$\frac{6263}{21,0}$	$\frac{6,11}{6,00}$	$\frac{2}{0,11}$	40,7	13960	91,4	–18...–20
		БОС	$\frac{6221}{20,0}$	$\frac{6,09}{5,41}$	$\frac{1}{0,28}$	42,9	13620	89,8	–11...–13
ВЛ10 2 секции	Московка – Ишим, равнинный, 294 км	СОС	$\frac{6474}{22,3}$	$\frac{5,16}{5,09}$	$\frac{1}{0,07}$	57,1	10990	57,7	+16...+18
		БОС	$\frac{6394}{21,7}$	$\frac{4,48}{4,41}$	$\frac{1}{0,07}$	62,8	10000	53,2	–18...–30

Примечания: СОС – движение с ограничениями скорости; БОС – движение без ограничений скорости; m_c – масса состава; $m_{во}$ – средняя масса на ось вагона; $T_{общ}$ – общее время хода; $T_{чд}$ – чистое время хода; $n_{ост}$ – количество остановок; $T_{ост}$ – продолжительность остановок; V_t – средняя техническая скорость; A_z – полный расход электроэнергии на тягу; a_z – удельный расход электроэнергии.

Средняя скорость движения и время хода поезда в определенной степени зависят от вида применяемых тормозов. Основным тормозом поезда, как известно, является пневматический тормоз, обеспечивающий безопасность движения. При движении поезда на спуске с применением автотормозов сначала происходит снижение скорости в режиме торможения, а затем после отпуска тормозов – ее возрастание в режиме выбега до допустимой величины. Из-за этого снижается средняя скорость движения и увеличивается время хода поезда, особенно на затяжных спусках большой крутизны с большим количеством пневматических торможений.

Электрическое торможение (рекуперативное и реостатное), которым оснащены все современные электровозы, позволяет поддерживать на спусках установившуюся максимальную скорость, близкую к допустимой, благодаря чему существенно сокращается время хода поезда на спусках и в целом на участке, особенно с холмистым (перевалистым) профилем пути. В качестве примера на рисунке 8 показана максимальная экономия времени при рекуперативном торможении электровоза 2ЭС6 с грузовым поездом массой 7100 т на спуске крутизной –10 ‰ с разной допустимой скоростью движения по сравнению с пневматическим торможением. Из графика видно, например, что при допустимой скорости $V = 80$ км/ч на спуске крутизной –10 ‰ применение рекуперативного торможения позволяет получить экономию времени движения до $\Delta T = 6,4$ с/км или $\Delta T = 14,2$ % по сравнению с пневматическим торможением, т. е. при длине спуска 10 км экономия времени составит 64 с.

Кроме экономии времени движения рекуперативное торможение, как известно, позволяет уменьшить энергозатраты на тягу, износ тормозных колодок вагонов, продольно-динамические силы, повысить плавность хода и безопасность движения поездов. В качестве примера на рисунке 9 показаны кривые удельного возврата электроэнергии при рекупера-

тивном торможении электровоза 2ЭС6 с грузовым поездом массой 7100 т на спусках разной крутизны, рассчитанные с использованием метода энергетического баланса. Разумеется, в целом на тяговом плече удельный возврат электроэнергии будет меньше, поскольку зависит от относительной протяженности участков рекуперативного торможения. Отчетные данные локомотивных депо с тяговыми плечами, имеющими холмистый (перевалистый) профиль пути, показывают, что экономия электроэнергии за счет применения рекуперативного торможения может достигать 20 % и более.

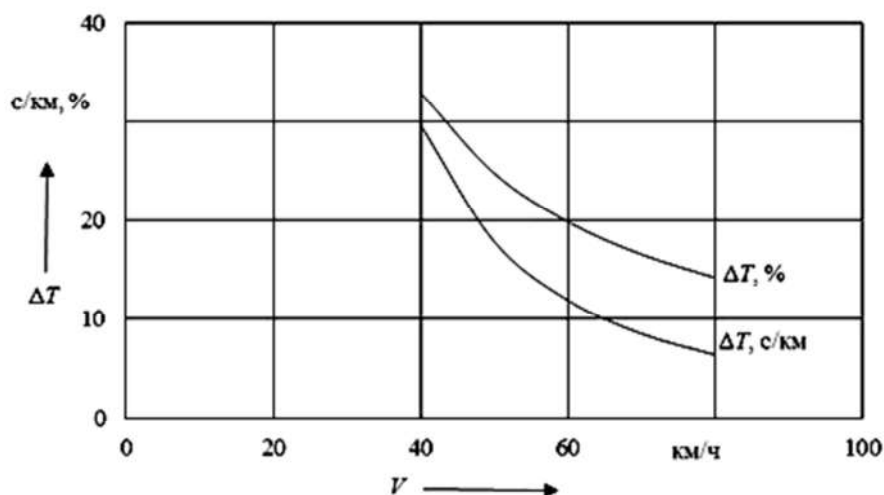


Рисунок 8 – Максимальная экономия времени при рекуперативном торможении электровоза 2ЭС6 с грузовым поездом массой 7100 т на спуске крутизной –10 ‰

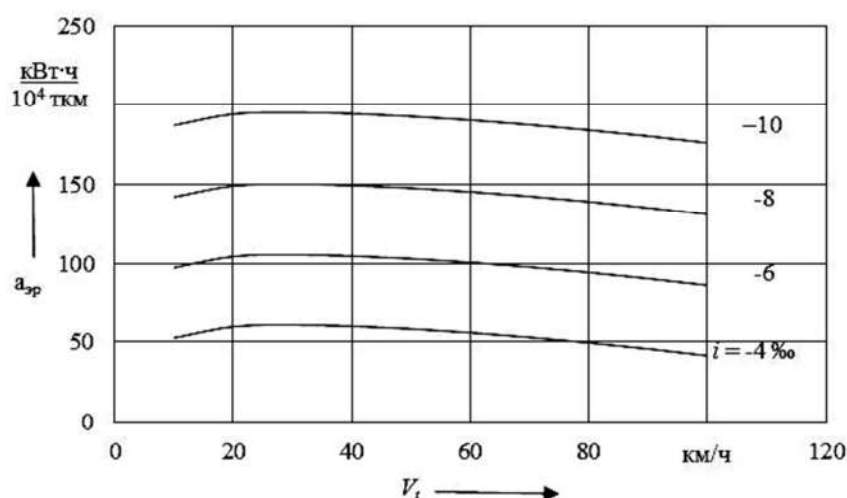


Рисунок 9 – Удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении электровоза 2ЭС6 с грузовым поездом массой 7100 т на спусках разной крутизны

Полученные результаты позволяют предложить проведение следующих мероприятий по повышению средней скорости движения, сокращению времени хода и энергозатрат грузовых поездов:

- провести теоретические и экспериментальные исследования по влиянию организации движения поездов на среднюю скорость, время хода и уровень электропотребления;

- провести обследования основных полигонов обращения грузовых поездов, особенно повышенной массы, выявить участки с наименьшей средней скоростью движения и наибольшими потерями времени хода, разработать мероприятия по сокращению затрат времени хода на них и повышению средней скорости движения;

разработать и проверить экспериментально методику оценки влияния скорости движения на время хода и энергозатраты грузовых поездов различной массы, в том числе повышенной массы 6000 т и более, с учетом основных эксплуатационных факторов;

разработать и проверить экспериментально методику влияния различных эксплуатационных факторов на энергооптимальную скорость движения грузовых поездов;

провести теоретические и экспериментальные исследования расхода электроэнергии на тягу и потерь энергии в тяговой сети при вождении грузовых поездов на участках постоянного и переменного тока с разными скоростями;

разработать методику оценки энергетической эффективности вождения грузовых поездов на участках постоянного и переменного тока с максимальным применением рекуперативного торможения, наметить комплекс мер по повышению уровня и расширению полигона применения рекуперации;

разработать и проверить экспериментально методику учета, анализа, нормирования и прогнозирования расхода электроэнергии на тягу грузовых поездов с учетом энергооптимальной скорости движения на основе энергетического баланса движения поездов.

Список литературы

1. Черномордик, Г. И. Повышение скоростей движения поездов [Текст] / Г. И. Черномордик. – М.: Транспорт, 1964. – 202 с.
2. Курбасов, А. С. Увеличение скорости на железных дорогах России: возможности и преимущества [Текст] / А. С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6. – С. 20 – 23.
3. ГОСТ Р 56046-2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
4. Статистика железнодорожного транспорта: Учебник [Текст] / Под ред. А. А. Поликарпова, А. А. Вовка. – М.: Маршрут, 2004. – 512 с.
5. Статистика железнодорожного транспорта: Учебник [Текст] / Под ред. Т. И. Козлова, А. А. Поликарпова. – М.: Транспорт, 1990. – 327 с.
6. Экономика железнодорожного транспорта: Учебник [Текст] / Под ред. Н. П. Терешинной, Л. П. Левицкой, Л. В. Шкуриной / УМЦ ЖДТ. – М., 2012. – 536 с.
7. Техничко-экономические показатели эксплуатационной работы железных дорог: Справочник [Текст] / И. А. Сметанин, Н. В. Ежова и др. – М.: Транспорт, 1977. – 112 с.
8. Гулев, Я. Ф. Основные показатели и измерители работы транспорта: Справочник [Текст] / Я. Ф. Гулев, П. К. Лебединский. – М.: Транспорт, 1980. – 216 с.
9. Экономический справочник железнодорожника [Текст] / А. П. Абрамов, М. Г. Ахшарумова и др.; Под ред. Б. И. Шафиркина. – М.: Транспорт, 1978. ч. I. – 398 с.
10. Экономический справочник железнодорожника [Текст] / В. И. Дмитриев, Г. В. Котов и др.; Под ред. Б. И. Шафиркина. – М.: Транспорт, 1978. ч. II. – 415 с.
11. Транссиб получил 7 суток [Электронный ресурс]. <http://portnews.ru/comments/1608/>
12. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М., 2016. – 513 с.
13. Тяговые расчеты: Справочник [Текст] / Под ред. П. Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
14. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов / А. А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2005. – № 6. – С. 32 – 35.
15. Бакланов, А. А. Затраты времени и энергии на ограничения скорости, задержки и остановки поездов / А. А. Бакланов // Известия Петербургского университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб., – 2007. – Вып. 2 (11). – С. 115 – 127.

References

1. Chernomordik G. I. *Povyshenie skorostej dvizheniya poezdov*. (Increase in train speeds). Moscow: Transport, 1964. 202 p.

2. Kurbasov A. S. Increase in speed on Russian railways: features and benefits [Uvelichenie skorosti na zheleznyh dorogah Rossii: vozmozhnosti i preimushchestva]. *Transport of the Russian Federation*, 2011, no. 6, pp. 20 – 23.

3. *Pokazateli is-pol'zovaniya lokomotivov GOST R 56046-2014*. (Terminy i opredeleniya National standard of Russian Federation GOST R 56046-2014). Moscow: Standartinform, 2015. 24 p.

4. Polikarpov A. A., Vovk A. A. *Statistika zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnik dlya vuzov* (Railway transport statistics: university textbook). Moscow: Marshrut, 2004. 512 p.

5. Kozlov T. I., Polikarpov A. A., Leonova E. P. *Statistika zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnik dlya vuzov* (Railway transport statistics: university textbook). Moscow: Transport, 1990. 327 p.

6. Tereshina N. P., Levitskaya L. P., Shkurina L. V. *EHkonomika zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnik dlya vuzov* (Railway transport economics: university textbook). Moscow: UMC of education on railway transport, 2012. 536 p.

7. Smetanin I. A., Ezhova N. V., Shlensky V. N., Vainerman F. M. *Tekhniko-ehkonomicheskie pokazateli ehkspluatacionnoj raboty zheleznyh dorog: Spravochnik* [Technical and economic indicators of the operational work of the railways: handbook]. Moscow: Transport, 1977. 112 p.

8. Gulev, J. F., Lebedinsky P. K. *Tekhniko-ehkonomicheskie pokazateli ehkspluatacionnoj raboty zheleznyh dorog: Spravochnik* (Main indicators and parameters of transport: Handbook). Moscow: Transport, 1980. 216 p.

9. Dmitriev V. I., Kotov G. V., Kochkina L. I. *EHkonomicheskij spravochnik zheleznodorozhnika* (Economic handbook of the railwayman). Part I. Moscow: Transport, 1980. 216 p.

10. Dmitriev V. I., Kotov G. V., Kochkina L. I. *EHkonomicheskij spravochnik zheleznodorozhnika* (Economic handbook of the railwayman). Part II. Moscow: Transport, 1980. 415 p.

11. *Transsib poluchil 7 sutok* (Transsib received 7 days). <http://portnews.ru/comments/1608/>

12. *Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty* (Traction calculation principles for train operation). Moscow, 2016. 513 p.

13. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Skvortsova A. I. *Tyagovye raschety: Spravochnik* (Traction calculation: handbook). Moscow: Transport, 1987. 272 p.

14. Baklanov A. A. Energy balance of motion for reducing energy consumption for traction of trains [EHnergeticheskij balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda ehlektroehnergii na tyagu poezdov]. *Transport: science, technology, management*. 2005, no. 6, pp. 32 – 35.

15. Baklanov A. A. Time and energy losses due to speed restrictions, train stops and delays [Zatraty vremeni i ehnergii na ogranicheniya skorosti, zaderzhki i ostanovki poezdov]. *Izvestiya of St. Petersburg state transport university Saint-Petersburg*. St. Petersburg State Transport University, 2007. Issue 2 (11). pp. 115 – 127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Cand. Eng. Sci., Associate Professor of the department «Rolling stock of electric Railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Влияние скорости движения на энергозатраты грузовых поездов [Текст] / А. А. Бакланов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 2 – 12.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A. A. Influence of speed on energy consumption of freight trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 2 – 12. (In Russian).

УДК 629.4.077

А. П. Буйносов, Е. В. Федоров

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ДЛИНЫ ТОРМОЗНОГО ПУТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Рассмотрены особенности применяемых в настоящее время методов расчета тормозного пути поезда. Показаны основные недостатки наиболее распространенного метода определения тормозного пути по интервалам скорости. Авторами предложен новый метод расчета, позволяющий учитывать основные параметры процесса торможения – скорость распространения тормозной волны; особенность диаграммы наполнения тормозных цилиндров; режим тормоза; начальную скорость, с которой начинается расчет действительного тормозного пути. Для верификации предлагаемого метода выполнено компьютерное моделирование и проведен анализ результатов, полученных при применении различных методов расчета длины тормозного пути. Новый метод позволяет точнее производить расчет длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав, путь, длина, тормоз, расчет, метод, совершенствование.

Alexander P. Buinosov, Evgeniy V. Fedorov

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALCULATING THE LENGTH OF THE BRAKING PATH OF RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. Features of the methods of calculation of a braking distance of the train applied now are considered. The main shortcomings of the most widespread method of definition of a braking distance on speed intervals are shown. Authors offered the new method of calculation allowing to consider critical parameters of process of braking (speed of a brake wave; character of an indicator diagram of the brake cylinder and mode of a brake; the actual initial speed for calculation of a way of action of brakes of the train). For verification of the offered method computer modeling is executed and the analysis of results of the different methods of calculation of braking length received at application is carried out. The new method allows to make calculation of braking length of the rolling stock more precisely.

Keywords: rolling stock, way, length, brake, calculation, method, improvement.

Железнодорожный транспорт – одна из крупнейших отраслей народного хозяйства, которая обеспечивает основную долю грузо- и пассажиропотока по всей России и за рубежом. Основной объем перевозочной работы на железнодорожном транспорте выполняют электровагоны, тепловозы, газотурбовозы и электропоезда [1].

Одной из главных задач по предотвращению и предупреждению опасных ситуаций на железнодорожном транспорте является безопасность движения. Главным средством обеспечения безопасности движения поездов являются тормоза железнодорожного подвижного состава. Тормозами называют комплекс устройств, направленных на создание искусственных сил сопротивления движению поезда при остановке, снижении скорости или поддержании ее на одном уровне [2].

Одним из основных показателей безопасности движения и эффективности тормозных средств является путь, пройденный в процессе торможения подвижного состава [3].

Тормозные расчеты позволяют определить следующие параметры движения подвижного состава:

- тормозной путь при начальной скорости торможения и заданных параметрах тормозных средств;
- допустимую скорость движения на участке при известной тормозной эффективности;
- реализуемый тормозной коэффициент поезда при известных величинах тормозного пути, скорости движения и уклона.

Для определения тормозного пути подвижного состава пользуются несколькими

методами расчета:

расчет тормозного пути по интервалам скорости (при данном методе тормозной путь для удобства расчетов разбивается на два: подготовительный и действительный, расчеты ведутся в интервалах скорости, при этом удельную тормозную силу и сопротивление движению условно считают постоянными и одинаковыми для среднего значения скорости в заданном интервале);

расчет тормозного пути путем интегрирования уравнения движения поезда при неустановившемся торможении;

расчет тормозного пути по интервалам времени (расчеты при данном методе ведутся в интервалах времени при условии постоянства давления в тормозных цилиндрах в этом интервале);

метод графического расчета тормозного пути;

нахождение тормозного пути по специальным графикам – номограммам (определение тормозного пути происходит по предварительно построенным кривым, показывающим зависимость тормозных путей от скорости движения, тормозных коэффициентов состава, крутизны спуска);

метод численного интегрирования системы дифференциальных уравнений и др.

Наиболее распространенным является метод определения тормозного пути по интервалам скорости [4].

Автоматические тормоза при управлении с локомотива приходят в действие последовательно от головного до хвостового вагона. Процесс срабатывания характеризуется скоростью тормозной волны v_B и временем наполнения тормозных цилиндров $t_{ц}$ до максимальной величины давления.

На рисунке 1 представлена схема нарастания удельной тормозной силы поезда в период подготовки автотормозов к действию, которая, по классификатору проф. Б. Л. Карвацкого [4], характеризуется тремя подготовительными и одной установившейся фазой торможения:

I – время t_B от начала срабатывания автотормозов до появления давления в тормозном цилиндре хвостового вагона;

II – время от начала срабатывания тормоза последнего вагона до полного торможения головного вагона;

III – время от полного торможения головного вагона до полного торможения хвостового вагона;

IV – данная фаза соответствует движению полностью заторможенного поезда.

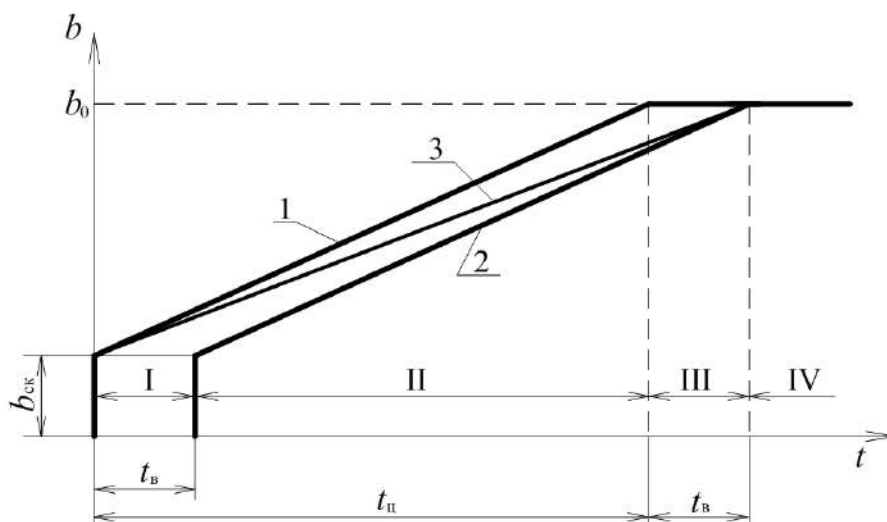


Рисунок 1 – Диаграмма нарастания удельной тормозной силы в поезде:

1 – удельная тормозная сила головного вагона; 2 – удельная тормозная сила хвостового вагона;

3 – средняя удельная тормозная сила

Современные правила тормозных расчетов основаны на приеме замены реального процесса постепенного роста тормозной силы на участок полного отсутствия тормозного эффекта с последующим мгновенным действием с максимальной тормозной эффективностью (рисунки 2). При этом допускают возможность такой замены в случае равенства тормозного пути, который проходит поезд при реальном и условном наполнении тормозных цилиндров (ТЦ). Тормозной путь при данном методе расчета разбивается на путь подготовки тормозов к действию S_n и действительный тормозной путь S_d [4].

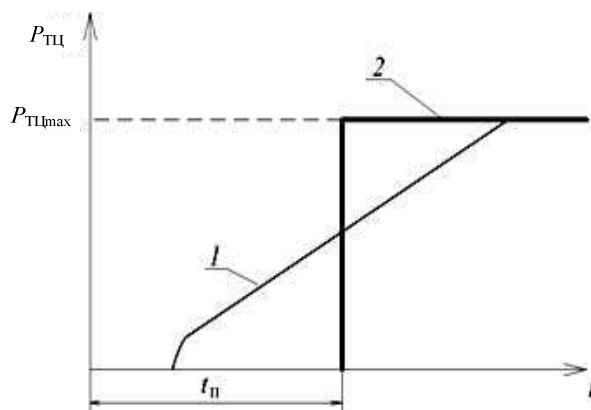


Рисунок 2 – Диаграмма возрастания давления в тормозном цилиндре вагона в зависимости от времени:

1 – действительное возрастания давления в ТЦ для среднего вагона в поезде;

2 – условное давление в ТЦ для среднего вагона в поезде

Путь, пройденный поездом с момента поворота крана машиниста в тормозное положение и до максимального наполнения сжатым воздухом тормозного цилиндра последнего вагона в составе, называют подготовительным S_n . Подготовительный тормозной путь определяется скоростью перед началом торможения V_0 и временем подготовки автотормозов к действию t_n и рассчитывается по формуле:

$$S_n = \frac{V_0 \cdot t_n}{3,6}. \quad (1)$$

Время подготовки тормозов к действию рассчитываются из условия равенства тормозного пути при реальном и условном изменении давления в тормозном цилиндре. В зависимости от типа подвижного состава и его длины время подготовки тормозов определяется по обобщенной формуле:

$$t_n = a \cdot \frac{b \cdot i_c}{b_T}, \quad (2)$$

где a , b – коэффициенты, зависящие от типа применяемых тормозов и количества вагонов в составе поезда;

i_c – спрямленный уклон пути, ‰;

b_T – удельная тормозная сила, Н/кН.

Действительный тормозной путь определяется операцией суммирования отрезков тормозных путей, рассчитанных по выбранным интервалам скорости. При условии постоянного значения величины удельной тормозной силы b_T , удельного сопротивления движению w_0 и спрямленного уклона i_c в принятом интервале скоростей действительный тормозной путь вычисляется по формуле:

$$S_d = 4,17 \sum \frac{V_n^2 - V_k^2}{b_T + w_0 + i_c}, \quad (3)$$

где V_n , V_k – соответственно начальная и конечная скорость в выбранном интервале скоростей, км/ч;

b_t , w_o – удельная тормозная сила и удельное сопротивление движению, действующие на поезд, при средней скорости в каждом интервале, Н/кН;

i_c – спрямленный уклон пути, на котором происходит торможение, ‰.

Для расчета величины действительного тормозного пути S_d задаются интервалом скоростей 10 км/ч (при решении на ПЭВМ – 5 км/ч), определяют разность квадратов начальной и конечной скорости, среднюю скорость в расчетном интервале, для среднего значения скорости находят величину удельной тормозной силы и сопротивления движению, а затем производят суммирование полученных отрезков тормозного пути [4].

Таким образом, метод расчета тормозного пути по интервалам скорости имеет ряд существенных недостатков, так, например, метод дает низкую точность при скоростях движения до 40 км/ч и на спусках более 20 ‰. Если же остановка состава происходит до полного наполнения тормозных цилиндров, то расчет по данному методу приведет к ошибочному (завышенному) значению тормозного пути. Кроме того, применяемый метод не учитывает изменение скорости движения при подготовке автотормозов к действию, а при расчете пути действия тормозов подставляется начальная скорость перед торможением. В расчет не принимаются также наличие первоначального скачка давления в тормозном цилиндре, время распространения тормозной волны и длина поезда.

Действующие правила тормозных расчетов условно делят процесс постепенного возрастания тормозной силы в поезде на два условных участка: участок полного отсутствия тормозной силы в начале процесса торможения и участок мгновенного действия тормозной силы поезда. Но целью расчетов является нахождение тормозного пути при неустановившемся процессе торможения.

В общем виде движение подвижного состава при торможении согласно второму закону Ньютона определяется выражением [5]:

$$M \cdot a = B_t + W_o, \quad (4)$$

где M – масса состава, кг;

a – ускорение, м/с²;

B_t – тормозная сила поезда, Н;

W_o – сопротивление движению, Н.

После математических преобразований движение поезда под действием удельной тормозной силы на площадке можно представить формулой:

$$a = (b_t + w_o)g, \quad (5)$$

или при движении по уклону:

$$a = (b_t + w_o \pm i_c)g, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Тогда начальная скорость V_n , при которой поезд перейдет в IV фазу установившегося торможения (см. рисунок 1), определится по формуле:

$$V_n = V_0 - 3,6a(t_{\text{ц}} + t_b), \quad (7)$$

где $t_{\text{ц}}$, t_b – соответственно время наполнения тормозного цилиндра и время распространения тормозной волны в поезде, с.;

a – среднее ускорение, пропорциональное средней удельной нарастающей тормозной силе поезда, м/с².

Среднее действующее значение ускорения рассчитывается по формуле:

$$a = [b_n + w_0 \pm i_c] g, \quad (8)$$

где b_n – средняя удельная тормозная сила за время подготовки автотормозов, Н/кН.

При этом значение тормозной силы определяется с помощью предлагаемого метода на основе известного выражения, например, для композиционных колодок:

$$B_r = 0,44mK \frac{0,1K + 20}{0,4K + 20} \left(\frac{V + 150}{2V + 150} \right), \quad (9)$$

где m – количество тормозных колодок на вагоне с нажатием K .

Первый из множителей формулы (9) определяет тормозную силу вагона в статическом состоянии $B_0 = 0,44mK \frac{0,1K + 20}{0,4K + 20}$, а второй сомножитель – функцию скорости

$$f(V) = \frac{V + 100}{5V + 100} \quad [6].$$

Тогда тормозную силу состава, при одинаковых тормозных колодках, можно выразить формулой [7]:

$$B = \sum B_0 \cdot f(V). \quad (10)$$

Расчет тормозной силы поезда удобно производить для различных видов торможения – колодочные, дисковые, электрический тормоз и т. д. [8].

Тогда средняя удельная тормозная сила за время подготовки автотормозов к действию определяется (согласно рисунку 1) формулой:

$$b_n = 0,5(b_0 + b_{ck}) \cdot f(V). \quad (11)$$

Значение удельной тормозной силы представлено для одного вагона, и это значение при наличии авторежима может относиться ко всему поезду, ведь назначение авторежима состоит в обеспечении постоянства расчетного тормозного коэффициента [9].

При этом путь подготовки тормозов [10]:

$$S_n = 0,28V_0(t_u + t_b) - 0,5a(t_u + t_b)^2 \quad (12)$$

или после преобразований:

$$S_n = 0,28V_0(t_u + t_b) - 0,005 \left[\frac{B_0 + B_{ck}}{Q} \cdot f(V) + w_0 \pm i_c \right] \cdot (t_u + t_b)^2. \quad (13)$$

Скорость, при которой тормозной процесс в поезде переходит в фазу установившегося торможения и с которой начинается расчет действительного тормозного пути методом суммирования по интервалам скорости, определится выражением:

$$V_n = V_0 - 0,018 \left(\frac{B_0 + B_{ck}}{Q} \cdot f(V) + w_0 \pm i_c \right) \cdot (t_u + t_b). \quad (14)$$

Расчет тормозного пути S_d выполняют методом численного интегрирования от начальной скорости V_n до полной остановки по рекомендуемой в работе [11] формуле:

$$S_d = \sum \frac{16,7V_n}{(b_0 \cdot f(V) + w_0 \pm i_c)}. \quad (15)$$

Выполнение расчетов начинают с начальной скорости, которая определяется при расчете подготовительного пути, и продолжают с заданным интервалом $\Delta V = 2$ км/ч до остановки поезда ($V = 0$).

Для этого следует составить алгоритм и, возможно, вспомогательную таблицу значений функции скорости $f(V_n)$ с интервалом значений скорости $\Delta V = 2$ км/ч.

Для проверки полученных выражений в программе «Универсальный механизм» (УМ) была составлена модель поезда и проведено компьютерное моделирование процесса торможения [12]. Характеристики модели представлены на рисунке 3.

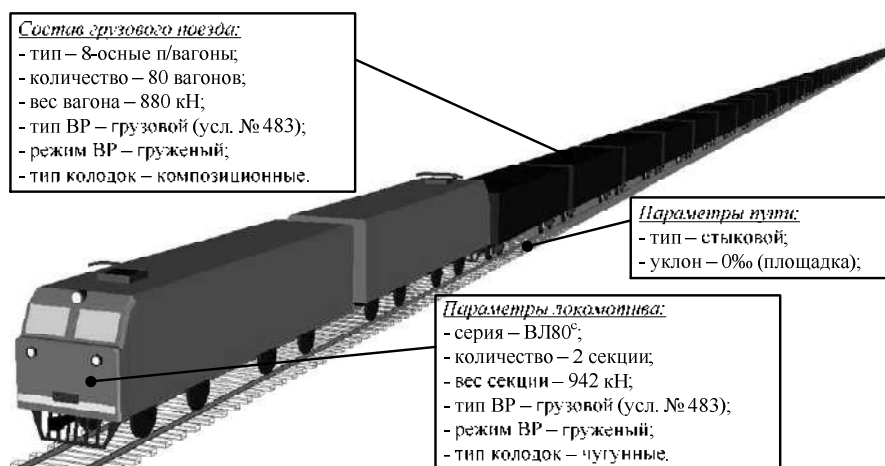


Рисунок 3 – Параметры компьютерной модели поезда

При моделировании процесса торможения поезда с начальной скоростью 80 км/ч и до полной остановки зафиксированы зависимости силы нажатия K колодки на колесо, тормозной силы B_T от времени торможения (рисунки 4 и 5).

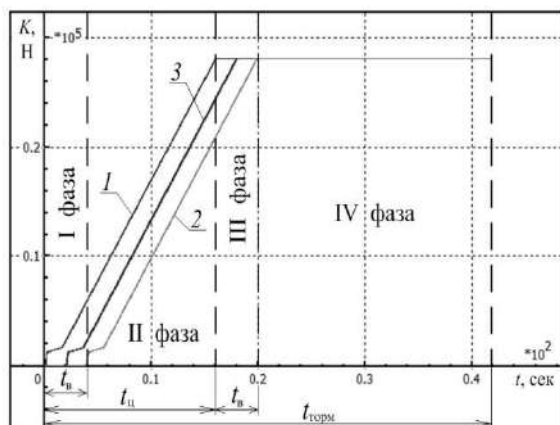


Рисунок 4 – Зависимость силы нажатия колодки на колесо от времени торможения:

1 – для головного вагона; 2 – для хвостового вагона;
3 – для среднего вагона в составе

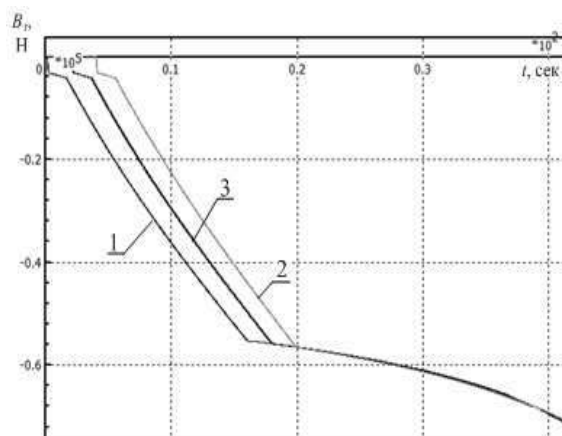


Рисунок 5 – Зависимость тормозной силы от времени торможения:

При этом получены следующие параметры процесса торможения: время распространения тормозной волны $t_v = 4$ с (современные воздухораспределители № 483 грузового типа реализовывают скорость распространения тормозной волны $v_v = 300$ м/с и выше), время наполнения тормозного цилиндра с нуля до максимального давления $t_{ц} = 16$ с, время от момента поворота ручки крана машиниста до полной остановки поезда $t_{торм} = 42$ с.

На рисунках 6 и 7 представлены графики изменения скорости и зависимости тормозного пути от времени торможения, полученные методом компьютерного моделирования.

Из рисунка 6 видно, что при данных условиях торможения скорость, с которой начинается расчет действительного тормозного пути, $V_n = 54$ км/ч.

В конечном итоге при использованных начальных условиях и характеристиках тормоз-

ной системы методом компьютерного моделирования определена величина тормозного пути поезда $S_T = 576$ м. При этом путь подготовки тормозов $S_n = 400$ м, а действительный тормозной путь $S_d = 176$ м.

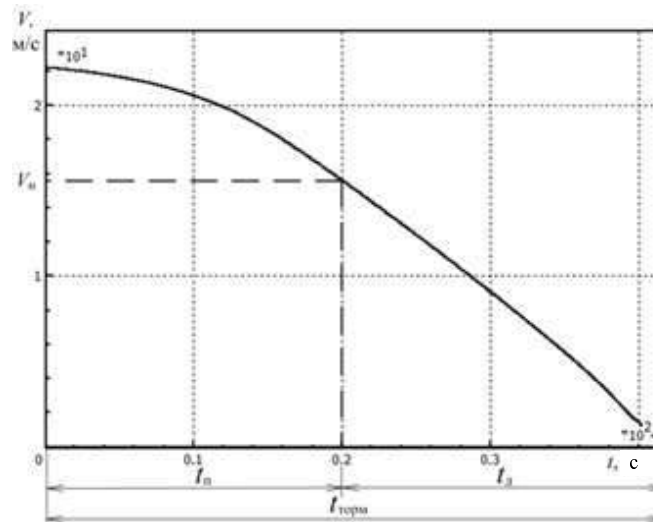


Рисунок 6 – График изменения скорости при торможении

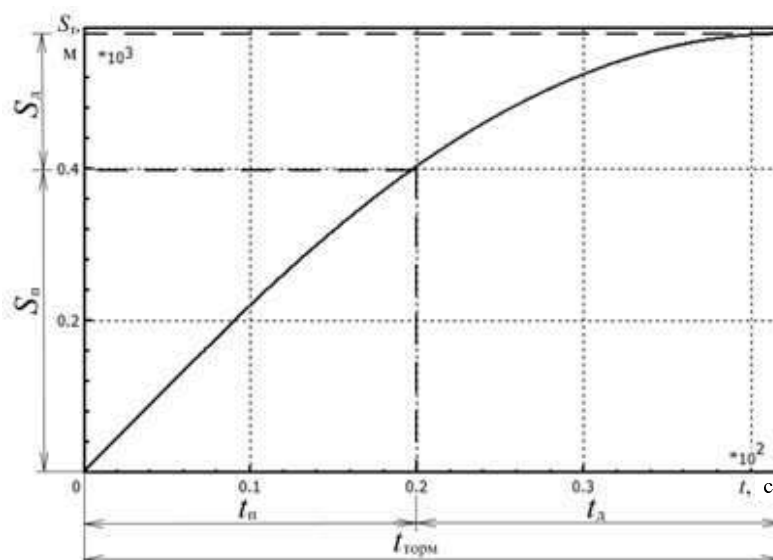


Рисунок 7 – График зависимости тормозного пути от времени торможения

При аналогичных начальных условиях и параметрах тормозной системы проведен расчет тормозного пути поезда методом интегрирования уравнения движения по интервалам скорости (применяемый метод расчета), а также предлагаемым методом расчета. Для удобства анализа результаты расчета сведены в таблицу.

Результаты расчета длины тормозного пути

Параметр	Методы расчета		
	компьютерное моделирование	предлагаемый метод	расчет тормозного пути по интервалам скорости
Скорость, при которой тормозные процессы в поезде перейдут в четвертую фазу торможения V_n , км/ч	54	58	—
Подготовительный тормозной путь S_n , м	400	384	266
Действительный путь торможения S_d , м	176	205	258
Общий тормозной путь S_T , м	576	589	524

Таким образом, в отличие от метода расчета тормозного пути по интервалам скорости предлагаемый метод позволяет более точно производить расчеты длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава, учитывая при этом следующие параметры:

- длину состава;
- скорость распространения тормозной волны;
- особенность индикаторной диаграммы тормозного цилиндра и режим тормоза;
- начальную скорость, с которой начинается расчет действительного тормозного пути.

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации [Текст] / А. П. Буйносов, И. М. Пышный, В. А. Тихонов // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский национальный исследовательский техн. ун-т. – Иркутск. – 2012. – № 1 (60). – С. 85 – 91.
2. Иванов, П. Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах [Текст] / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 17 – 25.
3. Наговицын, В. С. Алгоритм поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. С. Наговицын, А. П. Буйносов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного трансп. – Новосибирск. – 2014. – № 3 (21). – С. 17 – 21.
4. Карвацкий, Б. Л. Общая теория автотормозов: Учебное пособие [Текст] / Б. Л. Карвацкий. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1947. – 300 с.
5. Глушко, М. И. Проверка действия автотормозов [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2011. – № 1 (28). – С. 55 – 58.
6. Глушко, М. И. Развитие тормозных средств подвижного состава: Научная монография [Текст] / М. И. Глушко / УМЦ ЖДТ. – М., 2009. – 208 с.
7. Глушко, М. И. Закрепление вагонов автономными средствами [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Вагоны и вагонное хозяйство / ОАО «Российские железные дороги». – М. – 2012. – № 3. – С. 36, 37.
8. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 1 (25). – С. 60 – 70.
9. Буйносов, А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения: Научная монография [Текст] / А. П. Буйносов / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2009. – 224 с.
10. Федоров, Е. В. Метод расчета пути подготовки тормозов [Текст] / Е. В. Федоров // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012»: В 3 ч. / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, – 2012. – С. 300 – 302.
11. Глушко, М. И. Логика – тормозным расчетам [Текст] / М. И. Глушко, Е. В. Федоров // Локомотив / ОАО «Российские железные дороги». – М., – 2011. – № 12. – С. 28 – 30.
12. Буйносов, А. П. Повышение эффективности обработки бандажей триботехническим составом за счет изменения конструкции тормозной колодки [Текст] / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Научно-технический вестник Поволжья / Приволжский федеральный ун-т. – Казань. – 2016. – № 2 (32). – С. 48 – 50.

References

1. Buinosov A. P., Pyshnyi I. M., Tikhonov V. A. Remont lokomotivov bez prekrashcheniia ikh ekspluatatsii nosov [Sarta locomotives sine interpellandi eorum operatio]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1 (60), pp. 85 – 91.

2. Ivanov P. Iu., Manuilov N. I., Dul'skii E. Iu.. Prichiny samoproizvol'nogo srabatyvaniia avtotormozov v gruzovykh poezdakh [Dul'sky Causa spontanea activation dui iaculis in feugiat impedimenta]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 17 – 25.
3. Nagovitsyn V. S., Buinosov A. P. Algoritm poiska kriticheskikh uzlov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [The search algorithm for critical node of railway rolling stock]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2014, no. 3 (21), pp. 17 – 21.
4. Karvatskiy B. L. *Obshchaya teoriya avtotormozov* (General theory of autobrakes): Uchebnoe posobie dlya studentov vtuzov zh.-d. transp. Moscow: Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatel'stvo, 1947. 300 p.
5. Glushko M. I., Fedorov E. V. Proverka deistviia avtotormozov [Review of the action of automatic brakes]. *Transport Urala – The Urals Transport Bulletin*, 2011, no. 1 (28), pp. 55 – 58.
6. Glushko M. I. Razvitie tormoznykh sredstv podvizhnogo sostava [The development means the brake of the rolling stock]: monografiia. Moscow: FBGOU UMTs na zh.-d. transporte, 2009. 208 p.
7. Glushko M. I., Fedorov E. V. Zakreplenie vagonov avtonomnymi sredstvami [Fixing cars Autonomous vehicles]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo*, 2012, no. 3, pp. 36 – 37.
8. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Wilhelm A. S. Methodology of evaluation of efficiency of the use of regenerative braking and energy recovery [Methodus aestimatio efficientiam usum regenerativam braking, et industria recuperare]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 1 (25), pp. 60 – 70.
9. Buinosov A. P. *Pelagus causa intensive gerunt tires de rota paria volvens stirpe, et modis eorum, nulla* (The main reasons of intensive wear of bands of wheel couples of the rolling stock and methods of their elimination). Yekaterinburg: USURT, 2009, 224 p.
10. Fedorov E. V. Metod rascheta puti podgotovki tormozov [Method of calculation of the way of preparation of brakes]. *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2012»*: (Abstracts of the all-Russian scientific-practical conference «Transport-2012»). V 3-kh chastiakh. Rostov-na-Donu, 2012, pp. 300 – 302.
11. Glushko M. I., Fedorov E. V. Logiku – tormoznym raschetam [Logic-brake calculations]. *Lokomotiv*, 2011, no. 12, pp. 28 – 30.
12. Buinosov A. P., Tikhonov V. A. Povyshenie effektivnosti obrabotki bandazhei tribotekhnicheskim sostavom za schet izmeneniia konstruktsii tormoznoi kolodki [Improving the efficiency of processing bandages tribotechnical composition by changing the design of the brake pad]. *Scientific and technical Bulletin of the Volga region*, 2016, no. 2 (32), pp. 48 – 50.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буйнов Александр Петрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

Тел.: (343) 221-24-70, (343) 319-59-32.

E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru

Федоров Евгений Валерьевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Buinosov Alexander Petrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034, Russia. Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electric

traction», USURT.

Phone: (343) 221-24-70, (343) 319-59-32.

E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru

Fedorov Evgeny Valeryevich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034, Russia. Senior Lecturer of the department «Electric trac-

tion».

Tel: (343) 221-24-70.

Тел.: (343) 221-24-70.
E-mail: EFedorov@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Буйносов, А. П. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава [Текст] / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 13 – 22.

Buinosov A. P., Fedorov E. V. Improvement of the method of calculating the length of the braking path of railway rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 13 – 22. (In Russian).

УДК 621.331.1

С. Г. Истомин, Д. И. Бондаревский

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИИ 2ЭС6

Аннотация. В статье выполнена оценка влияющих факторов на расход электроэнергии на собственные нужды электровззов серии 2ЭС6, сформированы статистические модели для нормирования расхода электроэнергии на собственные нужды ЭПС и выполнена оценка их качества.

Ключевые слова: электроподвижной состав, удельный расход электроэнергии на собственные нужды, масса состава, нагрузка на ось, температура атмосферного воздуха, уравнение регрессии.

Stanislav G. Istomin, Denis I. Bondarevskiy

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF REGRESSION MODELS FOR ESTIMATING THE ENERGY EFFICIENCY OF AUXILIARY EQUIPMENT OF ELECTRIC LOCOMOTIVES OF THE 2ES6 SERIES

Abstract. The article assesses the influencing factors for electric power consumption for the needs of the electric locomotives of the 2ES6 series, statistical models for normalizing the electric power consumption for own power have been generated, and their quality has been assessed.

Keywords: electric rolling stock, specific electricity consumption for own needs, mass composition, axle load, ambient air temperature, regression equation.

Одной из приоритетных задач Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года является значительное повышение энергетической эффективности тяги поездов. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода тягово-энергетических ресурсов на тягу поездов к уровню 2015 г. должно составить к 2020 г. 2,5 – 4,4 %, к 2030 г. – 8,0 – 9,0 % [1]. На реализацию этой приоритетной задачи, в частности, направлены мероприятия по повышению энергетических характеристик электроподвижного состава (ЭПС) при его создании на заводах-изготовителях или модернизации эксплуатируемых локомотивов за счет подбора оптимальных по энергопотреблению параметров вспомогательного электрооборудования и организации контроля за его энергоэффективной работой и управления им.

В настоящее время на значительной части ЭПС ОАО «РЖД» отсутствует учет расхода электроэнергии на собственные нужды, что препятствует проведению оценки энергетиче-

ской эффективности работы вспомогательного оборудования и разработке рекомендаций по ее повышению. В общем случае оценку расхода электроэнергии на собственные нужды ЭПС можно выполнить на основе анализа параметров вспомогательного электрооборудования, заявленных в руководствах по эксплуатации ЭПС, однако подобный метод оценки не позволяет достоверно определить значение и характер потребления электроэнергии данного оборудования, так как не учитываются режимы его работы.

Наиболее достоверную информацию о расходе электроэнергии на собственные нужды ЭПС можно получить экспериментальным путем. Экспериментальные исследования [2, 3], выполненные на Транссибирской магистрали учеными ОмГУПСа для электровозов постоянного тока серии ВЛ10 и учеными ИрГУПСа для электровозов переменного тока серии ВЛ85, показывают, что расход электроэнергии на собственные нужды ЭПС постоянного тока составляет до 10 % от общего расхода на тягу поездов, а на ЭПС переменного тока – до 20 %, причем основная часть потребления электроэнергии используется на систему вентиляции.

Довольно высокое значение расхода электроэнергии на собственные нужды ЭПС старых серий обусловлено в первую очередь отсутствием автоматизированной системы контроля и управления за потреблением электроэнергии вспомогательным оборудованием ЭПС, учитывающей влияние различных случайных факторов, определяющих энергосберегающие режимы его работы.

На электровозах постоянного тока серии 2ЭС6, оснащенных преобразователем собственных нужд, позволяющим управлять асинхронными приводами вспомогательных машин, отсутствует учет электроэнергии на собственные нужды, однако на картриджах регистраторов параметров движения электровоза 2ЭС6, являющихся составляющими микропроцессорной системы управления движения МПСУиД, имеется информация о токе собственных нужд электровоза и напряжении на токоприемнике, что при проведении дополнительной обработки массива данных позволяет получать информацию о расходе электроэнергии на собственные нужды и оценивать энергетическую эффективность вспомогательного оборудования [4, 5].

Авторами подобный метод анализа впервые был апробирован применительно к участку Москва – Барабинск протяженностью 316 км, который отличается преимущественно равнинным профилем пути. Выборка была составлена из поездок порожних и груженых поездов с электровозами серии 2ЭС6, эксплуатирующихся на данном участке в течение календарного года. В результате обработки данных картриджей регистраторов параметров движения электровозов серии 2ЭС6 было установлено, что доля расхода электроэнергии на собственные нужды от общего расхода электроэнергии в четном направлении составляет от 2,91 до 8,66 % (рисунок 1), а в нечетном – от 2,72 до 10,14 % (рисунок 2).

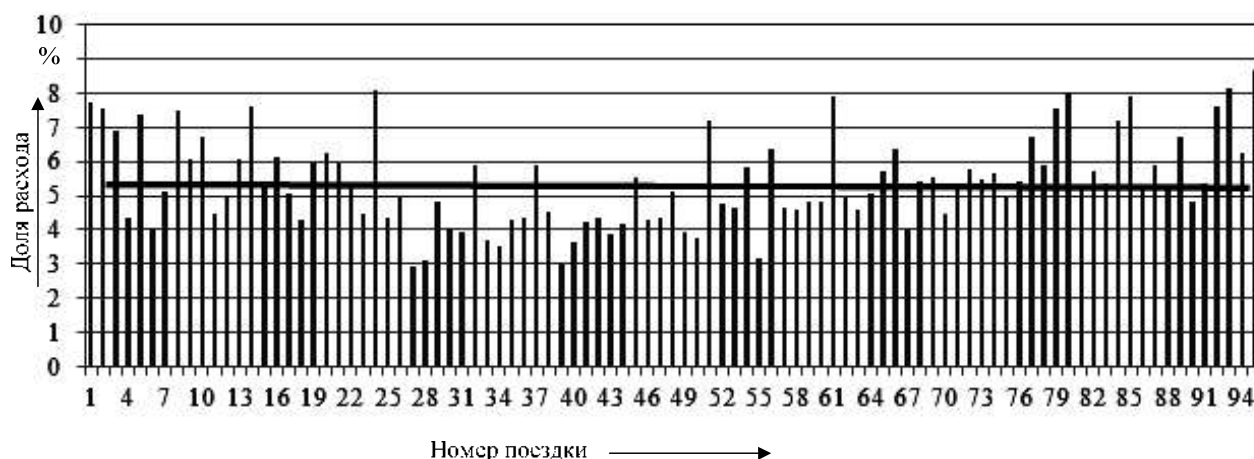


Рисунок 1 – Доля расхода электроэнергии на собственные нужды от общего расхода электроэнергии на тягу на участке Москва – Барабинск (четное направление)

Данные результаты свидетельствуют о том, что доля расхода электроэнергии на собственные нужды электровозов 2ЭС6 от общего расхода электроэнергии так же, как и на электровозе ВЛ10, достигает 10 %. Однако наличие только этой информации не позволяет сделать вывод о том, что применение статического преобразователя на электровозах 2ЭС6, позволяющего управлять асинхронными приводами вспомогательных машин, неоправданно, так как эксперименты выполнены на различных участках и в различных условиях. На основании полученных результатов можно сделать однозначный вывод о том, что имеется значительный потенциал снижения расхода электроэнергии на собственные нужды, реализовать который можно за счет совершенствования алгоритмов работы статического преобразователя, подбора оптимальных по энергопотреблению параметров вспомогательного электрооборудования на основе исследования влияния различных случайных факторов, определяющих энергосберегающие режимы его работы.

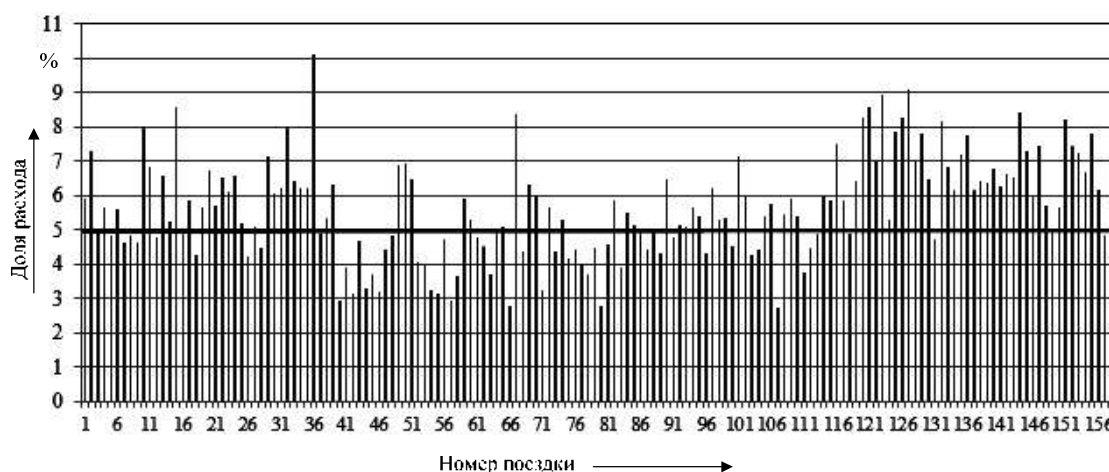


Рисунок 2 – Доля расхода электроэнергии на собственные нужды от общего расхода электроэнергии на тягу на участке Московка – Барабинск (нечетное направление)

Для выявления влияющих факторов на удельный расход электроэнергии (УРЭ) на собственные нужды электровозов серии 2ЭС6 и формирования статистических моделей для оценки их энергетической эффективности использовался корреляционно-регрессионный метод математической статистики. Основные расчеты производились в программе Microsoft Excel с использованием пакета «Анализ данных» на основе информации регистраторов параметров движения из выборки поездок с электровозами 2ЭС6 в четном и нечетном направлениях за календарный год.

Исследование проводилось в несколько этапов.

На первом этапе для исследования были выбраны факторы: масса состава (m), нагрузка на ось (n_0), температура атмосферного воздуха (t), среднее напряжение на токоприемнике (U_{cp}), количество остановок (N) и участковая скорость движения электровоза (V_y).

На втором этапе исследования для набора факторов, указанных выше, сформированы варианты статистических моделей (таблица 1) с целью дальнейшей оценки их адекватности и статистической значимости коэффициентов этих моделей.

На третьем этапе определены коэффициенты регрессии в сформированных статистических моделях, стандартная ошибка, t -статистика, p -значение, нижняя и верхняя границы доверительного интервала (таблицы 2 и 3) и выполнена проверка адекватности данных моделей путем оценки уровня значимости α (Microsoft Excel этот показатель именуется как p). p -значение – это вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы, т. е. гипотеза о том, что все коэффициенты регрессии равны нулю. Если p -значение меньше 0,05 то гипотеза о незначимости регрессии отвергается и считается, что регрессия значима. В нашем случае для выбранных статистических моделей p -значение не превышает уровня значимости 0,05.

На четвертом этапе выполнена оценка статистической значимости коэффициентов регрессии для уравнений вида 1 и 2 из таблицы 1. Итоговые результаты оценки приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 1 – Варианты статистических моделей для оценки их адекватности и статистической значимости коэффициентов этих моделей

Номер модели	Вид статистической модели
1	$a_{с.н.} = B_0 + B_1m + B_2n_0 + B_3t + B_4U_{ср} + B_5N + B_6V_{твх}$
2	$a_{с.н.} = B_0 + \frac{B_1}{m} + \frac{B_2}{n_0} + B_3t + B_4U_{ср} + B_5N + B_6V_{твх}$

Таблица 2 – Результаты оценки статистической значимости коэффициентов регрессии для уравнения вида 1

Фактор	Направление	Коэффициент регрессии В	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
Свободный член регрессии	Четн.	20,8	11,8	1,75	0,083	-2,79	44,4
	Нечетн.	12,9	5,06	2,55	0,012	2,93	22,9
Масса состава, т	Четн.	-0,00063	0,00025	1,75	0,016	-0,0011	-0,00012
	Нечетн.	-0,00057	0,00016	-3,64	0,0004	-0,0008	-0,00026
Нагрузка на ось, т	Четн.	-0,206	0,072	-2,89	0,005	-0,349	-0,064
	Нечетн.	-0,098	0,047	-2,11	0,036	-0,191	-0,006
Температура, °С	Четн.	-0,062	0,012	-5,28	9,2·10⁻⁷	-0,086	-0,039
	Нечетн.	-0,064	0,0063	-10,1	9,9·10⁻¹⁹	-0,076	-0,051
Среднее напряжение на токоприемнике, В	Четн.	-0,0026	0,003	-0,77	0,439	-0,009	0,004
	Нечетн.	-0,00079	0,00148	-0,53	0,58	-0,004	0,002
Количество остановок, шт.	Четн.	0,0247	0,303	0,081	0,94	-0,578	0,627
	Нечетн.	0,095	0,173	0,55	0,59	-0,245	0,437
Участковая скорость, км/ч	Четн.	-0,027	0,04	-0,66	0,506	-0,106	0,053
	Нечетн.	-0,034	0,021	-1,63	0,106	-0,076	0,007

Таблица 3 – Результаты оценки статистической значимости коэффициентов регрессии для уравнения вида 2

Фактор	Направление	Коэффициент регрессии В	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член регрессии	Четн.	9,78	8,54	1,15	0,26	-7,19	26,7
	Нечетн.	3,4	5,13	0,66	0,51	-6,72	13,5
Масса состава, т	Четн.	12055	1822	6,62	2,8·10⁻⁹	8434	15676
	Нечетн.	8404	1495	5,62	8,7·10⁻⁸	5451	11356
Нагрузка на ось, т	Четн.	11,1	7,67	1,44	0,152	-4,17	26,3
	Нечетн.	13,0	5,43	2,39	0,018	2,29	23,7
Температура, °С	Четн.	-0,061	0,0089	-6,85	9,5·10⁻¹⁰	-0,078	-0,043
	Нечетн.	-0,063	0,0064	-9,83	6,0·10⁻¹⁸	-0,075	-0,05

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее напряжение на токоприемнике, В	Четн.	-0,0025	0,0024	-1,04	0,298	-0,0073	0,0023
	Нечетн.	-0,0001	0,0015	-0,077	0,934	-0,003	0,0029
Количество остановок, шт.	Четн.	0,21	0,23	0,91	0,36	-0,246	0,664
	Нечетн.	0,051	0,177	0,289	0,773	-0,298	0,399
Участковая скорость, км/ч	Четн.	-0,017	0,03	-0,554	0,581	-0,077	0,044
	Нечетн.	-0,034	0,022	-1,57	0,119	-0,077	0,009

Рассмотрим механизм оценки статистической значимости коэффициентов регрессии на примере таблицы 2. В зависимую переменную «удельный расход электроэнергии на собственные нужды» электровоза 2ЭС6 больший вклад в четном и нечетном направлениях вносит температура атмосферного воздуха ($p = 9,2 \cdot 10^{-7}$ и $p = 9,9 \cdot 10^{-19}$), а меньший вклад в четном и в нечетном направлениях – количество остановок ($p = 0,94$ и $p = 0,59$). Отрицательный знак коэффициентов при переменных означает, что с увеличением, к примеру, в четном направлении массы состава, нагрузки на ось и температуры величина удельного расхода снижается. Положительный знак коэффициента при переменной «количество остановок» означает, что с увеличением количества остановок уровень удельного расхода растет. Коэффициенты уравнения регрессии B_1, B_2, B_3 для четного и нечетного направлений статистически значимы при уровне значимости $p = 0,05$; коэффициенты уравнения регрессии B_4, B_5, B_6 статистически незначимы, так как $p > 0,05$ [6]. В результате проведения описанного анализа было установлено, что статистически значимыми факторами, оказывающими влияние на УРЭ на собственные нужды электровозов серии 2ЭС6 в четном и нечетном направлениях, являются для уравнения 1 масса состава, нагрузка на ось и температура окружающего воздуха, а для уравнения 2 в четном направлении – масса состава и температура окружающего воздуха, а в нечетном – масса состава, нагрузка на ось и температура окружающего воздуха.

На пятом этапе исследования на основе приведенных выше результатов сформированы статистические модели, учитывающие представленные выше статистически значимые факторы, для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 и проведена оценка их качества (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение коэффициентов детерминации R^2 для различных статистических моделей

Направление	Номер модели	Вид статистической модели	Коэффициент детерминации R^2
Четное	1	$a_{\text{с.н.}} = 10,3 + 0,006 \cdot m - 0,214n_0 - 0,061t$	0,587
	2	$a_{\text{с.н.}} = 0,43 + \frac{14040}{m} - 0,059t$	0,752
Нечетное	3	$a_{\text{с.н.}} = 8,27 + 0,0006 \cdot m - 0,097n_0 - 0,061t$	0,645
	4	$a_{\text{с.н.}} = 1,05 + \frac{8390}{m} + \frac{13,3}{n_0} - 0,061t$	0,637

Для оценки качества прогнозирования используется коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2$ – сумма квадратов остатков регрессии;

$\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2$ – общая сумма квадратов.

Данный коэффициент дает численную оценку того, насколько изменчивость прогнозируемой величины объясняется включенными в модель факторами.

Следует отметить, что с целью анализа различных уравнений регрессии определение регрессионных коэффициентов данных уравнений выполнялось по всем значениям выборки из генеральной совокупности.

По результатам исследования (см. таблицу 4), можно сделать следующие выводы:

значения R^2 во всех случаях превышают значения 0,5, что свидетельствует о сильной связи между $a_{с.н.}$ и выбранными факторами;

использование модели 2 в четном направлении и модели 3 в нечетном направлении позволит достичь в значительной мере более достоверного определения нормы УРЭ на собственные нужды электровозов серии 2ЭС6 в сравнении с моделями 1 и 4 (получены более высокие значения R^2) и выполнить качественную оценку энергетической эффективности их вспомогательного оборудования.

Важно отметить, что данные параметры (нагрузка на ось, масса состава и температура) являются известными перед поездкой, что позволяет в дальнейшем осуществлять оперативное прогнозирование УРЭ на собственные нужды электровозов серии 2ЭС6.

Важной предпосылкой корректности использования уравнения регрессии является тот факт, что остатки подчиняются нормальному закону (рисунок 3).

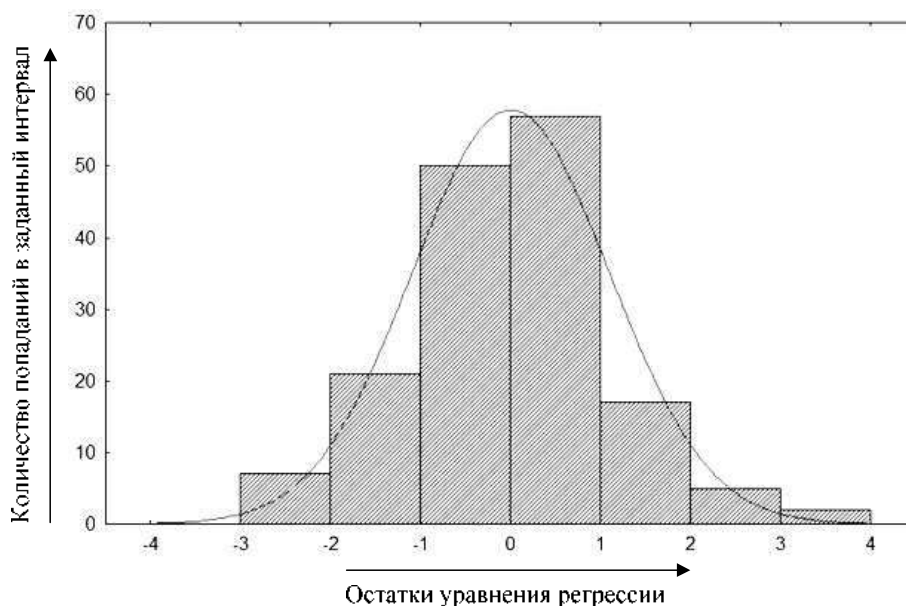


Рисунок 3 – Распределение остатков уравнения регрессии по нормальному закону

Проверка нормальности остатков выполнена с помощью критерия согласия Пирсона χ :

$$\chi^2_{\text{набл}} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}, \quad (2)$$

где n_i – наблюдаемые частоты в i -м интервале группирования;

n_i' – теоретические частоты.

В рассмотренных случаях при уровне значимости 0,05 не было оснований отвергнуть гипотезу о нормальности. Наблюдаемые значения получились ниже критических.

В конечном итоге по полученным уравнениям регрессии были определены соответствующие нормы УРЭ на собственные нужды электровозов серии 2ЭС6 и проведен анализ их сходимости с фактическими значениями (рисунки 4 и 5). По результатам анализа можно сделать вывод о том, что полученные уравнения регрессии 2 и 3 из таблицы 4 достаточно точно описывают характер изменения УРЭ на собственные нужды электровозов 2ЭС6, поэтому их можно использовать для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования данных электровозов на участке Московка – Барабинск.

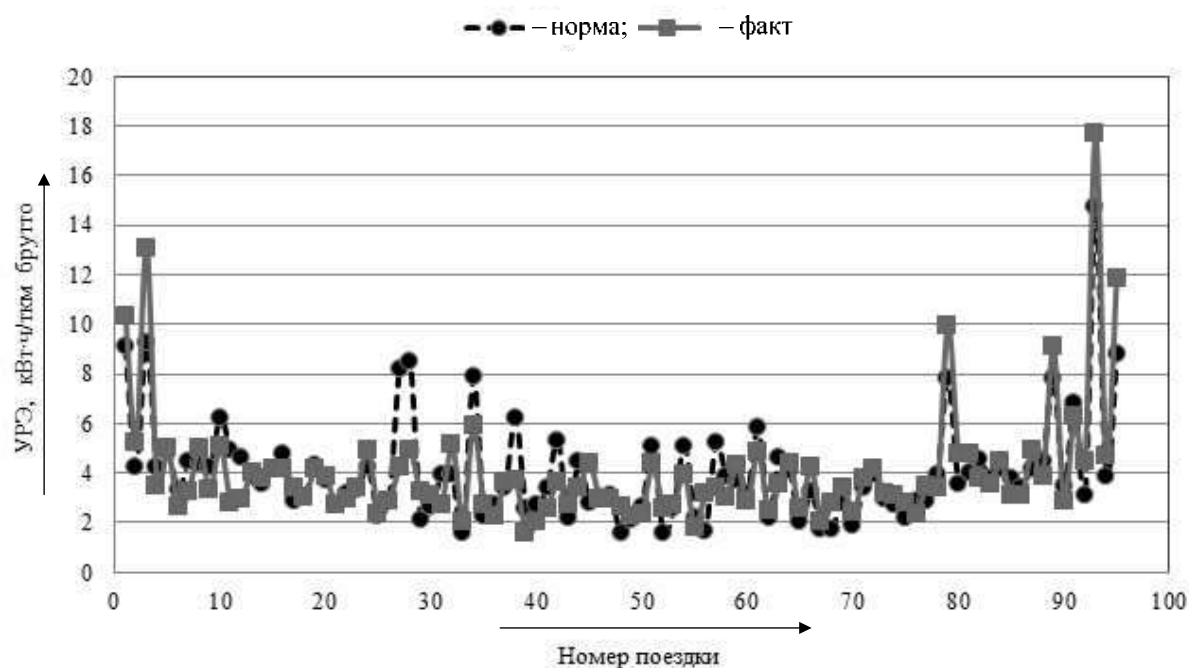


Рисунок 4 – Сходимость фактических и расчетных значений удельного расхода электроэнергии на собственные нужды электровозов 2ЭС6 на участке Московка – Барабинск (четное направление)

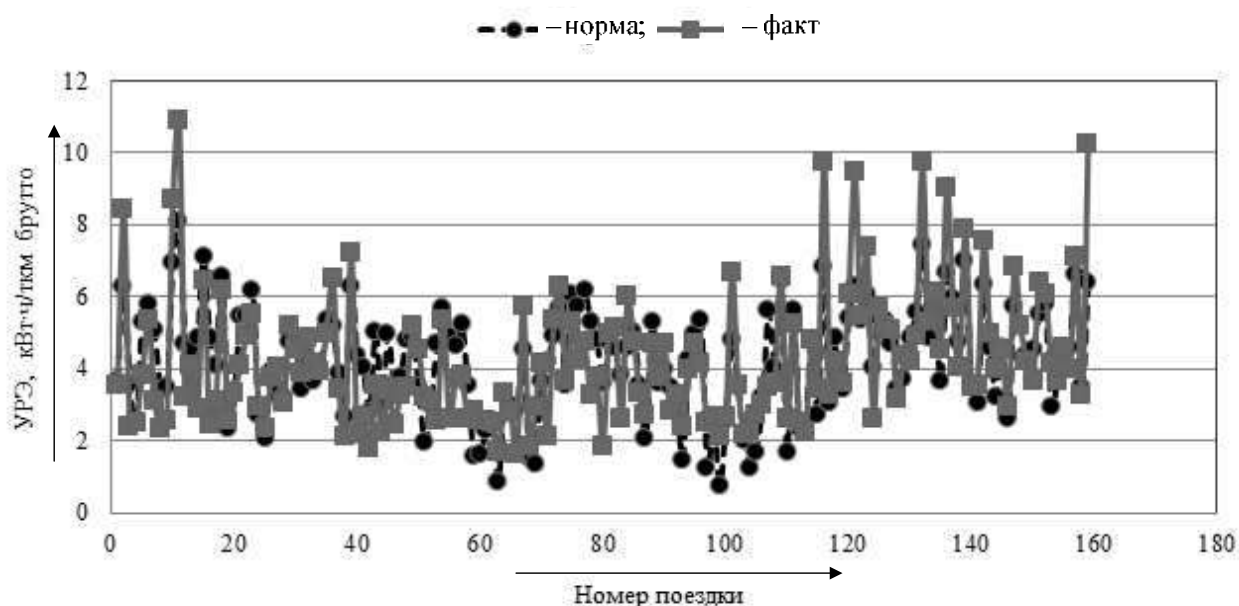


Рисунок 5 – Сходимость фактических и расчетных значений удельного расхода электроэнергии на собственные нужды электровозов 2ЭС6 на участке Барабинск – Московка (нечетное направление)

Исследования, проведенные авторами, показали целесообразность применения корреляционно-регрессионных методов математической статистики для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 на примере одного участка, однако окончательный ответ о пригодности данных методов можно будет дать после проведения полномасштабных исследований на участках с различным типом профиля пути.

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. Бакланов, А. А. Анализ расхода электроэнергии на собственные нужды электровоза ВЛ10 [Текст] / А. А. Бакланов, Р. Я. Медлин // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: Науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1974. – С. 51 – 57.
3. Бакланов, А. А. Влияние различных факторов на расход электроэнергии вспомогательными машинами электровоза ВЛ10 [Текст] / А. А. Бакланов // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: Науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1977. – С. 46 – 51.
4. Бондаревский, Д. И. Экспериментальная оценка потребления электроэнергии электровозами серии 2ЭС6 «Синара» [Текст] / Д. И. Бондаревский // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 42 – 46.
5. Истомин, С. Г. К вопросу энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 [Текст] Истомин С. Г., Бондаревский Д. И. // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 151 – 156.
6. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: Учебник [Текст] / А. А. Халафян. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

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. Baklanov A. A., Medlin P. Y. The analysis of an expense of the electric power for own needs of an electric locomotive of VL10 [Analiz rashoda jelektroroenergii na sobstvenii nuzdy jelektroroza VL10]. *Study the operation of electrical equipment and the durability of the electric rolling stock: Scientific works*. Omsk, 1974, pp. 51 – 57.
3. Baklanov A. A. Influence of different factors on an electric power expense satellite machines of an electric locomotive VL10 [Vliyanie razlichnyh faktorov na rashod jelektroroenergii vspomogatelnyimi mashinami jelektroroza VL10]. *Study the operation of electrical equipment and the durability of the electric rolling stock: Scientific works*. Omsk, 1977, pp. 46 – 51.
4. Bondarevskiy D. I. Experimental assessment of electricity consumption by electric locomotives of the series 2ES6 «Sinara» [Jeksperimentalnaya ochenka potrebleniya jelektroroenergii jelektrorozami serii 2ES6 «Sinara»]. *The Trans-Siberian Bulletin*. Omsk, 2016, pp. 42 – 46.
5. Istomin S. G., Bondarevskiy D. I. To a question of power efficiency of the auxiliary equipment of electric locomotives of a series 2ES6 [K voprosu jenergeticheskoy jeffektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya jelektrorovozov serii 2ES6]. *The Trans-Siberian Bulletin*. Omsk, 2017, pp. 151 – 156.
6. Halafyan A. A. STATISTICA 6. Statistical analysis this [Statistika 6. Statisticheskij analiz dannyh]. Moscow: ООО «Binom-Press», 2007, 512 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru

Бондаревский Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: 8-913-962-18-71.

E-mail: dis_bond@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru

Bondarevskiy Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

The post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: 8-913-962-18-71.

E-mail: dis_bond@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Истомин, С. Г. Применение регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 [Текст] / С. Г. Истомин, Д. И. Бондаревский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 22 – 30.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Istomin S. G., Bondarevskiy D. I. Application of regression models for estimating the energy efficiency of auxiliary equipment of electric locomotives of the 2ES6 series. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 1, no 33, pp. 22 – 30 (In Russian).

УДК 629.42.083

С. Т. Калиева, В. Н. Панченко

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЯ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные методы технической диагностики топливной аппаратуры дизелей. Перечислены неисправности, обнаруживаемые с помощью этих методов. Детально рассмотрены принципы работы методов, выявлены недостатки и преимущества выбранных методов.

Ключевые слова: тепловоз, техническая диагностика, акустический метод, вибродиагностика двигателя, топливная аппаратура, топливопровод высокого давления, диаграмма давления, топливный насос высокого давления.

Safura T. Kalieva, Valerii N. Panchenko

Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

ANALYSIS OF MODERN TECHNICAL DIAGNOSTICS METHODS APPLIED FOR MONITORING OF DIESEL LOKOMOTIVE FUEL EQUIPMENT

Abstract. In this article, the main methods of technical diagnostics of diesel fuel equipment are considered. The faults they detect are listed. The principles of the methods work are examined in detail, the shortcomings and advantages of the chosen methods are revealed.

Keywords: locomotive, technical diagnostics, vibro-acoustic method, vibration diagnostics of the engine, fuel equipment, high pressure fuel line, pressure diagram, high pressure fuel pump.

Исправное состояние локомотива характеризуется как состояние, соответствующее всем требованиям, изложенным в нормативно-технических документах, и установленным параметрам, которые обеспечивают нормальное выполнение заданных функций. Несоблюдение этих условий свидетельствует о неисправности локомотива [1].

В настоящее время неразрушающий контроль и системы диагностирования становятся основополагающими для современных систем мониторинга и диагностики дизеля. Повышение эффективности и надежности работы дизелей тепловозов в эксплуатации напрямую зависит от снижения расхода топлива, уменьшения количества отказов и unplanned ремонтов. Наиболее важной задачей при проведении технического обслуживания и технических ремонтов и в эксплуатации является совершенствование методов и средств контроля и диагностики тепловозов [2].

Одним из показателей, по которым оценивается надежность и качество содержания тепловозов, а также эффективность работы ремонтных цехов, является количество unplanned ремонтов и отказов в пути следования. Благодаря системам диагностирования можно предупредить отказы в пути следования и заранее определять необходимость постановки локомотивов в ремонт в соответствии с фактическим их состоянием.

Одним из важнейших аспектов при разработке диагностических систем дизелей тепловозов является исправная работа топливной аппаратуры. В первую очередь ее работа основывается на том, что на долю топливной аппаратуры приходится значительное количество отказов в эксплуатации. На рисунке 1 показан процент неисправностей топливной аппаратуры, который зависит от типа двигателя и его конструкции и варьируется в пределах 12 – 30 % [3].

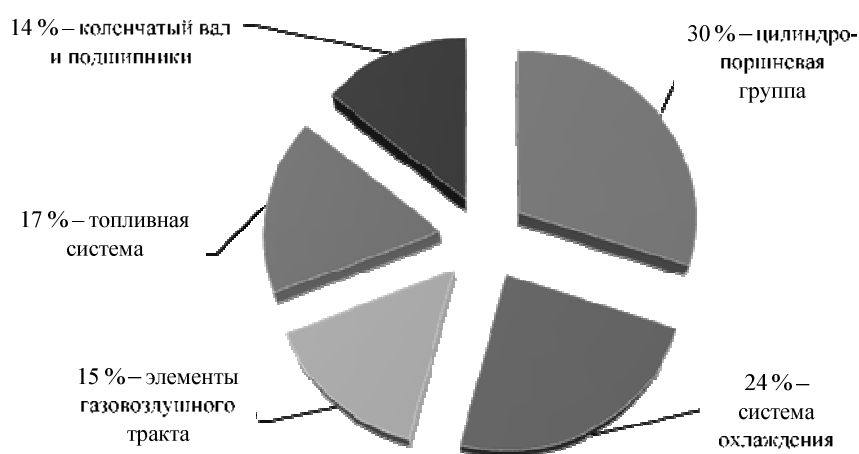


Рисунок 1 – Процент неисправностей по узлам и системам дизеля

В настоящее время для определения технического состояния локомотива необходимо ввести данные, удовлетворяющие требованиям диагностических систем. К ним относятся следующие: а) выполнение диагностики на частичных режимах работы (даже на холостом ходу); б) применимость диагностических систем к различным видам двигателя; в) универсальность диагностических приборов.

Работоспособность топливной аппаратуры можно определить по структурным и диагностическим параметрам (таблица).

Можно выделить три метода диагностирования топливной аппаратуры [4]:

- виброакустический;
- по давлению в топливопроводе высокого давления;
- по ходу иглы форсунки.

Структурные и диагностические параметры двигателя

Параметры	
Структурные параметры	Диагностические параметры
Износ деталей топливopодкачивающего насоса	Давление топлива перед фильтром тонкой очистки
Загрязненность фильтрующих элементов	Перепад давления до и после фильтра тонкой очистки
Объемный расход топлива	Расход топлива отдельными секциями
Износ плунжерной пары	Длительность нарастания и волны давления в насосе и коэффициент подачи топлива по отдельным секциям износа
Износ сопряжения: разгружающий поясok – гнездо клапана	Остаточное давление в нагнетательном трубопроводе
Продолжительность впрыскивания топлива	Перемещение иглы распылителя форсунки
Износ распылителя и регулировка силы затяжки пружины форсунки	Давление топлива под иглой (давление впрыскивания)

Виброакустическая диагностика является одним из передовых направлений безразборной технической диагностики топливной аппаратуры дизеля. Принцип работы этого метода заключается в фиксировании периодических ударных импульсов, возникающих в форсунке, с помощью виброизмерительной аппаратуры. В виброизмерительном оборудовании первичный преобразователь – это, как правило, пьезоэлектрический акселерометр, устанавливаемый на трубку высокого давления форсунки с помощью винтовой струбины.

Для поддержания системы в работоспособном состоянии необходимо соблюдение некоторых условий: к системе дополнительно должен быть подключен датчик определения верхней мертвой точки (ВМТ) для того, чтобы измерить действительный угол опережения топливopодачи. В качестве контролируемой поверхности топливной аппаратуры используются наружная поверхность нагнетательного трубопровода для увеличения уровня автоматизации процесса диагностирования и уменьшения числа виброакустических преобразователей.

Использование данного метода диагностирования топливной аппаратуры позволяет определить такой диагностический параметр, как деформация стенок трубопровода. В аналого-цифровой преобразователь поступает диагностический сигнал, полученный через пьезоэлектрический преобразователь из наружной поверхности трубопровода. Данные средства диагностирования входят в систему диагностирования подвижного состава и в большинстве случаев используются как в процессе эксплуатации локомотивов, так и непосредственно для определения технического состояния тягового подвижного состава.

Стоит отметить, однако, что данный метод диагностики имеет существенный недостаток. Он заключается в отсутствии ожидаемых ударных импульсов у форсунки с малым отклонением в работе, что может привести к неработоспособности метода. Помехи низкой частоты быстро распространяются по всем деталям дизеля, а значит, вместе с полезным сигналом от форсунки на виброграмму будут наложены посторонние помехи от перекаладки поршня, ударов газораспределительного механизма и др. Этот метод требует присутствия оператора при проведении испытаний дизеля. Однако эти недостатки компенсируются простотой и удобством в замерах выходных параметров.

Метод диагностирования по диаграмме давления в топливопроводе высокого давления в настоящее время является самым распространенным благодаря легкоустанавливаемым датчикам накладного типа на топливопровод высокого давления [4].

Чувствительный элемент данного преобразователя – это пленка, которая обладает пьезоэлектрическим эффектом, благодаря которому малые деформации стальной трубки модифицируются в электрический сигнал. Разность потенциалов на выходе из датчика прямо пропорциональна усилию восприятия пьезоэлемента и давлению.

Можно отметить, что существуют некоторые ограничения, заключающиеся в сложности точного определения величины давления. Вызвано оно тем, что усилие, созданное деформи-

рующей трубкой на чувствительную часть датчика, зависит от многих параметров, таких как давление, жесткость стенок трубопровода, их толщина, качество поверхности трубопровода и расположение в пространстве датчика при установке его на трубке.

Существует определенная связь между работой топливной аппаратуры дизеля и характером изменения давления в топливопроводе. В течение практически всего цикла работы дизеля давление в топливопроводе высокого давления остается неизменным и равно величине остаточного давления.

На рисунке 2 в точке 1 отражен момент, когда происходит скачок (повышение) давления, вызванный открытием нагнетательного клапана и нагнетательным ходом плунжера насоса. В зоне 2 наблюдается открытие нагнетательного клапана на фоне длительного увеличения давления, которое вызывает скачок давления. До тех пор, пока давление в трубопроводе высокого давления не увеличится до усилия затяжки пружины форсунки, ее игла неподвижна. Впрыскивание топлива форсункой происходит в точке 3, это приводит к уменьшению давления в трубопроводе. В этот же момент нагнетательный ход плунжера вызывает скачок давления, на который накладываются отраженные и прямые волны давления топлива в трубе. Точка 4 соответствует резкому падению давления, т. е. приводит к окончанию нагнетательного хода плунжера.

Точкой 5 на диаграмме показан момент окончания посадки иглы форсунки при максимальном давлении. Зона 6 является зоной слабозатухающих колебаний остаточного давления, которые появились благодаря закрытию топливопровода с обеих сторон, т. е. со стороны насоса и со стороны форсунки, что привело к отражению волны на границах трубки.

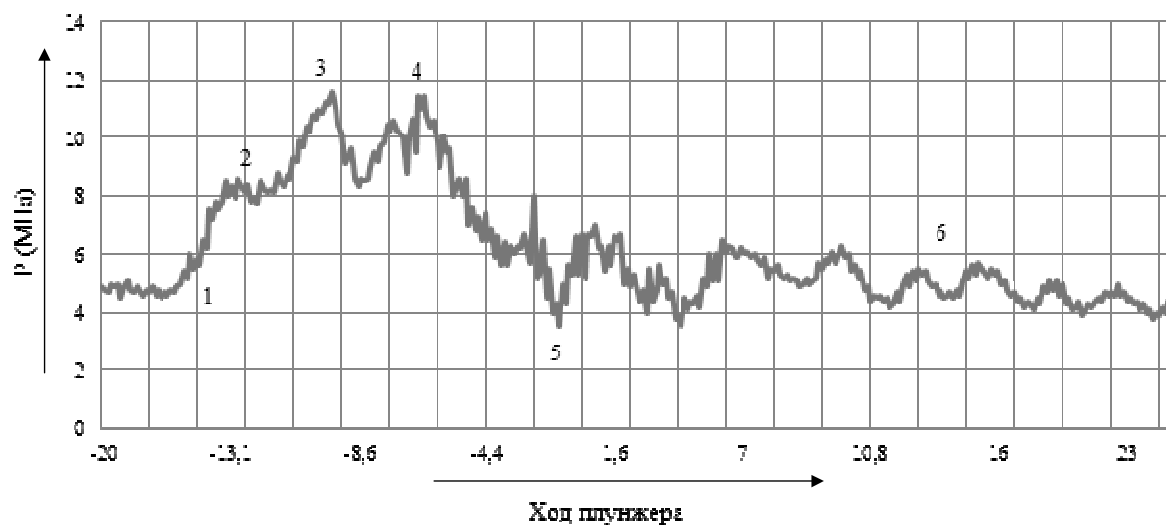


Рисунок 2 – Диаграмма давления топлива в топливопроводе (ТВД) дизеля (участок впрыска)

Очевидно, что значительно большей достоверностью и диагностической ценностью, по сравнению с сигналом вибрации, обладает диаграмма, которая получена с помощью датчика перемещения иглы форсунки.

Измеряемыми параметрами диагностических признаков диаграммы давления являются следующие значения:

- амплитуды колебаний давления на участке «сжатия» топлива;
- амплитуды колебаний остаточного давления.
- давления начала подачи топлива насосом;
- давления окончания подачи топлива насосом;
- давления в момент начала подачи топлива;
- фазовых характеристик топливоподачи;
- давления начала впрыска топлива форсункой;
- давления подачи топлива форсункой.

Самыми распространенными отклонениями в работе топливной системы, а именно форсунок, являются следующие:

ослабление затяжки пружин, которое приводит к снижению давления начала впрыска;

неплотности в распылителях форсунок (причина: использование некачественного топлива, неправильная сборка форсунки или дефекты изготовления, которые приводят к «подтеканию» форсунки);

неплотности плунжерной пары (причина: износ трущихся поверхностей плунжерной пары). Увеличение радиального зазора между гильзой и плунжером может привести к повышению доли топлива, которое протекает через зазор в полости с низким давлением, что, в свою очередь, вызывает увеличение расхода топлива в дренажной магистрали насоса. При одинаковых скоростях плунжера повышенное перетекание топлива приводит к «затягиванию» участка сжатия топлива и к уменьшению угла опережения подачи топлива форсункой;

неплотности нагнетательного клапана (причиной чаще всего является его износ).

Названные неисправности форсунки являются показателями ухудшения рабочего процесса дизеля, но в целом топливная система остается работоспособной. По диаграмме давления топлива можно легко определить неисправности другой группы, которые приводят к отказам в работе форсунки и цилиндра дизеля.

В методе диагностирования по ходу иглы форсунки главным устройством является индуктивный датчик [4]. Он устанавливается на форсунке так, что подвижный шток (его приемная часть) двигается вместе с иглой форсунки. Типовая диаграмма хода иглы форсунки приведена на рисунке 3.

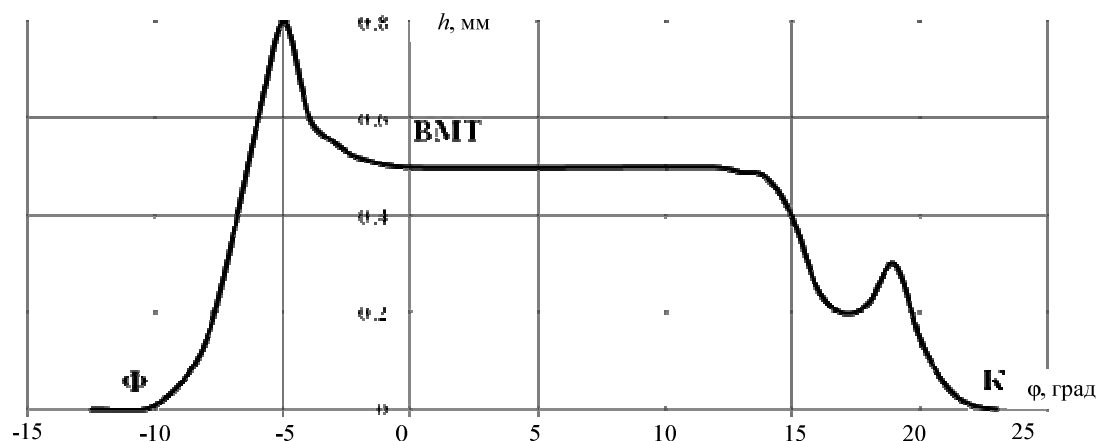


Рисунок 3 – Диаграмма хода иглы форсунки: Ф – начало подачи топлива (начало движения иглы); К – окончание подачи топлива (посадка иглы)

Наряду с фазовой характеристикой по диаграмме определяются высота подъема иглы и наличие колебаний иглы в процессе «подвпрыска». Производятся расчеты темпа (скорости) подъема иглы, темпа посадки иглы и др. В общем, все эти параметры позволяют определить практически все неисправности форсунок и топливного насоса высокого давления.

Недостатком метода, кроме малой универсальности, является невысокая надежность индуктивного датчика, так как он имеет в своей конструкции изнашиваемые подвижные механические элементы.

На основе полученных диагностических сигналов можно составить информационную модель. Используя теорию информации, можно в требуемом объеме описать объект диагностирования – как датчик, измерительные приборы, так и преобразователи информации, средства отображения информации, а также и само диагностирование как процесс снятия диагностического сигнала при определении работоспособного состояния объекта.

Самым главным преимуществом данной модели является единство математического аппарата, описывающего различные объекты и процессы, что позволяет проявить их информа-

ционную сущность. Это позволяет, используя информационную модель, связать в единое целое самые различные параметры системы технического диагностирования и рассматривать их взаимовлияние.

С информационной точки зрения объект диагностирования – это датчик диагностического преобразователя, имеющего среднеквадратичное значение σ_x^2 . Измерительный прибор системы технического диагностирования характеризуется среднеквадратической погрешностью и полосой пропускания W . Количество информации, полученной при диагностировании,

$$I = \frac{WT \log_2(\sigma_x^2 + \sigma_n^2)}{\sigma_n^2}. \quad (1)$$

Учитывая неравенство $\sigma_x^2 \gg \sigma_n^2$, получим:

$$I = \frac{2WT \log_2 \sigma_x}{\sigma_n}. \quad (2)$$

Система технического диагностирования ограничена во времени возможностью отказа. Среднее время безотказной работы системы в течение периода T

$$T_1 = T_0(1 - p), \quad (3)$$

где $T_0 = \frac{1}{\lambda}$ – средняя наработка на отказ, λ – параметр потока отказов, а величина $p = e^{-\lambda t}$ –

вероятность безотказной работы. Таким образом, сокращение времени работы системы технического диагностирования за счет возможного отказа можно рассматривать как уменьшение информации о состоянии. Информационные потери можно определить по выражению:

$$\Delta I = I - I_1 = 2W[T - T_0(1 - p)] \log_2(\sigma_x / \sigma_n). \quad (4)$$

Исходя из положений теории информации потери необходимо рассматривать как увеличение среднеквадратической погрешности прибора до величины σ_x / σ_n . Важно отметить, что количество информации I зависит от точности, безотказности, полосы пропускания и является комплексным показателем качества системы технического диагностирования.

В общем случае информационные модели объекта диагностирования можно рассматривать как частные случаи моделей планирования эксперимента. Главная задача – в конечном счете получать максимум информации о состоянии при наименьших затратах времени и ресурсов.

После рассмотрения перечисленных методов диагностирования топливной аппаратуры можно сделать выводы об их обоснованности. Метод виброакустической диагностики является простым и доступным, но имеет существенный недостаток – невозможность правильно проверять замеры на «шумах» низкой частоты. Метод диагностирования по диаграмме давления в топливopровode высокого давления – самый распространенный метод диагностики топливной аппаратуры. После внедрения датчиков измерения давления в топливной аппаратуре стало возможным легко измерить давление на любом участке топливopровода, также существует и недостаток – измеренное давление имеет погрешность из-за механических и геометрических параметров трубопровода. Метод диагностирования по ходу иглы форсунки является более точным, но не обладает универсальностью, так как не подходит для всех типов дизеля. Как следует из сказанного, из всех методов только, с помощью метода диагностирования по диаграмме давления в топливopровode высокого давления диагностики топливной аппаратуры можно определить и момент начала рабочего хода плунжера (начало подачи топлива насосом), и момент действительной подачи топлива в цилиндр (начало подачи

топлива форсункой). Это значительно повышает эффективность метода применительно к регулировке угла опережения подачи топлива.

Список литературы

1. Панченко, В. Н. Вибродиагностика тепловозных дизелей [Текст] / В. Н. Панченко, А. Ю. Балакин // Материалы науч.-практ. конф. «Надежность железнодорожной техники и управление» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2007 – С. 125 – 127.
2. Калиева, С. Т. Техническая безразборная диагностика локомотивов как современный метод технического диагностирования [Текст] / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование – транспорту» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2016. – С. 36, 37.
3. Зигельман, Е. Б. Вибродиагностика приводов среднеоборотных дизелей ОАО «Коломенский завод» [Текст] / Е. Б. Зигельман, А. Б. Матисен, И. А. Лощинин // Техническая акустика. – 2014. – Вып. 5. – С. 1 – 11.
4. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст]: Учебное пособие / В. И. Бервинов. УМК МПС России. – М., 1998. – 190 с.
5. Просвилов, Ю. Е. Проблемы совершенствования систем диагностирования тепловозных дизелей [Текст] / Ю. Е. Просвилов / Самарский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Самара, 1999. – 218 с.
6. Панченко, В. Н. Моделирование процессов топливоподачи в тепловозных дизелях [Текст] / В. Н. Панченко, А. Ю. Балакин, Е. М. Плохов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Перспективы и направления развития транспортной системы» / Самарский науч. центр РАН. – Самара, 2007 – С. 225 – 229.
7. Носырев, Д. Я. Использование доминантных параметров при контроле и диагностировании тепловозных дизелей [Текст] / Д. Я. Носырев, В. А. Краснов, А. Г. Старикова // Материалы всерос. науч.-практ. конф. «Транспортное образование и наука: проблемы и перспективы» / Уфимский филиал Самарского гос. ун-та путей сообщения. – Уфа, 2012. – С. 265 – 269.
8. Носырев, Д. Я. Основные направления повышения эффективности использования тепловозов [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, С. А. Петухов // Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 287 – 291.
9. Калиева, С. Т. Автоматизированная система диагностики МСУ-ТП в тепловозах 2ТЭ116У [Текст] / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // Материалы X междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование – транспорту» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2017. – С. 39 – 42.
10. Калиева, С. Т. Применение тепловизионного метода диагностики для контроля электрических аппаратов локомотива [Текст] / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // материалы междунар. студ. науч.-практ. конф. «Современное состояние и тенденции развития железных дорог» / Нижегородский филиал Самарского гос. ун-та путей сообщения. – Нижний Новгород, 2017. – 356 с.

References

1. Panchenko V. N., Balakin A.Ya. Vibrodiagnostics of diesel locomotives. [Vibrodiagnostika teplovoznikh dizeleyi] *Materiali VIII mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferencii «Nauka i obrazovanie transporty»*. Samara, 2016, pp. 125 – 127.
2. Kalieva S. T., Panchenko V. N. Technical indispensable diagnostics of locomotives as a modern method of technical diagnosis [Technicheskaya bezrazbornaya diagnostika lokomotivov kak sovremennii metod technicheskogo diagnostirovaniyai]. *Materiali VIII mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferencii «Nauka i obrazovanie transport»*. Samara, 2016, pp. 36 – 37.
3. Zigelman E. B., Matisen A. B., Loshchinin I. A. Vibrodiagnostics of drives of medium-speed diesel engines of Kolomensky Zavod [Vibrodiagnostika privodov sredneoborotnikh dizelei ОАО

Kolomenskii zavod]. *Tekhnicheskaya Akustika – The journal of Technical Acoustics*, 2014, no 5, pp. 1 – 11.

4. Bervinov V. I. *Technical diagnosis of locomotives* (Technicheskoe diagnostirovanie lokomotivov). Moscow: EMM of the Ministry of Railways of Russia, 1998. 190 p.

5. Prosvirov Yu. E. Problems of improving diagnostic systems of heat diesel engines (Problemi sovershenstvovaniya sistem diagnostirovaniya teplovoznikh dizelei). Samara: SamSTU, 1999. 218 p.

6. Panchenko V. N., Balakin A. Yu., Plokhov E. M. Modeling of fuel supply processes in diesel locomotives. [Modelirovanie processov toplivopodachi v teplovoznich dizeliach]. *Izvestiia Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. Spetsial'nyi vypusk «Perspektivy i napravleniia razvitiia transportnoi sistemy»*. Samara, 2007, pp. 225 – 229.

7. Nosyrev D. Ya., Krasnov V. A., Starikova A. G. Use of dominant parameters in the control and diagnosis of diesel locomotives [Ispolzovanie dominantnykh parametrov pri kontrole i diagnostirovanii teplovoznikh dizelei]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnoe obrazovanie i nauka: problemy i perspektivy»*. Ufa, SamSTU, 2012, pp. 265 – 269.

8. Nosyrev D. Ya., Muratov A. V., Petukhov S. A. The main directions of increasing the efficiency of the use of diesel locomotives. [Osnovnie napravlevie povysheniia effektivnosti ispolzovaniya teplovoznov]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunar. uchastiem «Ekspluatatsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysenie effektivnosti tiagi poezdov»*. Omsk, OmSTU, 2012, pp. 287 – 291.

9. Kalieva S. T., Panchenko V. N. Automated system of diagnostics MSY-TP in locomotives 2ТЭ116У. [Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki MSU-TP v teplovoznakh 2TE116U]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno -prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie transportu»*. Samara, SamSTU, 2017, pp. 39 – 42.

10. Kalieva S. T., Panchenko V. N. Application of thermal imaging diagnostic method for control of electric locomotive apparatus. [Primeneniye teplovizionnogo metoda diagnostiki dlya kontrolya elektricheskikh apparatov lokomotiva]. *Materialy Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennoe sostoianie i tendentsii razvitiia zheleznykh dorog»*. Nizhny Novgorod, SamSTU, 2017. 356 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калиева Сафура Талаповна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант 2-го года обучения кафедры «Локомотивы», СамГУПС.

Профиль направления «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация».

Тел.: +7(939)754-47-75, +7(846)-255-68-58.

E-mail: kalieva-safura@mail.ru

Панченко Валерий Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», декан ПС, СамГУПС.

Тел.: +7(927)014-94-11, +7(846)-255-68-58.

E-mail: v.panchenko@samgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kalieva Safura Talapovna

Samara State Transport University (SamSTU).

2v, st. Svobodi, Samara, 443066, the Russian Federation.

Post-graduate student of the 2nd year of the department of «Locomotives», SamSTU.

Profile of the direction «Rolling stock of railways, traction of trains and electrification».

Phone: +7(939)754-47-75, +7(846)-255-68-58

E-mail: kalieva-safura@mail.ru

Panchenko Valerii Nikolaevich

Samara State Transport University (SamSTU).

2v, st. Svobodi, Samara, 443066, the Russian Federation.

Kandidat of Technical Sciences, Docent of the department «Locomotives», Dean PS, SamSTU.

Phone: +7(927)014-94-11, +7(846)-255-68-58.

E-mail: v.panchenko@samgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Калиева, С. Т. Анализ современных методов технической диагностики, применяемых для контроля топливной аппаратуры дизеля локомотива [Текст] / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 30 – 38.

Kalieva S. T., Panchenko V. N. Analysis of modern technical diagnostics methods applied for monitoring of diesel locomotive fuel equipment. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 30 – 38 (In Russian).

УДК 629.423 + 6

П. А. Коропец, С. А. Хачкинаян, А. В. Кашуба

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОВОЗА ЭП20 В РЕЖИМЕ БОКСОВАНИЯ

Аннотация. Построена математическая модель тягового привода электровоза ЭП20 для исследования динамических процессов в режиме боксования. Определены собственные частоты и коэффициенты форм динамической системы. Выполнена оценка устойчивости привода по отношению к фрикционным автоколебаниям. Рассчитаны динамические нагрузки в элементах привода при единичной угловой скорости скольжения колес. Сформулированы рекомендации по повышению динамических качеств тягового привода в режиме боксования.

Ключевые слова: математическая модель, собственные частоты, фрикционные автоколебания, устойчивость, динамические нагрузки.

Peter A. Koropets, Stepan A. Khachkinayan, Alexander V. Kashuba

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia

DYNAMIC PROCESSES IN THE TRACTION DRIVE OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE EP20 IN SLIDING MODE

Abstract. The mathematical model of traction drive Electric locomotive EP20 for research of dynamic processes in a mode of boxing is constructed. The natural frequencies and coefficients of the forms of the dynamic system are determined. The stability of the drive in relation to frictional self-oscillations is estimated. Dynamic loads in the drive elements at a single angular speed of wheel slip are calculated. The recommendations on increasing the dynamic qualities of the traction drive in the sliding mode are formulated.

Keywords: mathematical model, natural frequencies, frictional self-oscillations, stability, dynamic loads.

Электровоз ЭП20 задуман как головной проект масштабной программы широкого ряда российских электровозов нового поколения. Поэтому работы по поиску новых перспективных конструкторских решений по его модернизации, а также по созданию на его базе новых машин продолжают [1].

Одним из наиболее высоконагруженных режимов, встречающихся в эксплуатации подвижного состава, является режим боксования. Для этого режима характерны резкие изменения условий сцепления колес с рельсами, высокие скорости скольжения колес относительно рельсов и динамические нагрузки в элементах тягового привода, в несколько раз превышающие нагрузки в режимах тяги, выбега или торможения.

Данная статья посвящена исследованию динамических качеств тягового привода электровоза ЭП20 в режимах боксования. Исследование выполняется с помощью математических моделей и разработанных на их основе аналитических методов расчета.

В настоящее время в открытых источниках (статьи, доклады и пр.) практически отсут-

ствуется информация о результатах натурных испытаний новых конструкций подвижного состава. В ряде случаев неизвестно даже, проводились ли вообще те или иные натурные испытания. Электровоз ЭП20 в этом смысле не является исключением.

В СССР испытания на боксование были обязательными для всех видов отечественного и поставляемого из-за рубежа тягового подвижного состава. При этом предполагалось, что электронные средства борьбы с боксованием отсутствуют или не исправны. Они преднамеренно отключались и начинались фактически испытания тягового привода на прочность.

Такой подход (нагрузки на грани разрушения), несмотря на высокую достоверность получаемой информации, существенно ограничен количеством образцов и вариантов испытываемых конструкций. Кроме того, такие испытания требуют больших затрат материальных средств и времени.

Свободным от указанных недостатков является математическое моделирование, позволяющее за сравнительно малое время в пределах ограниченных средств получить информацию о динамических процессах в тяговом приводе, об уровне динамических нагрузок и о возможных путях совершенствования его конструкции.

Целью настоящей работы было исследование методами математического моделирования особенностей динамических процессов в тяговом приводе электровоза ЭП20 в режиме боксования.

Механическая часть электровоза ЭП20 состоит из кузова и трех двухосных бесшкворневых тележек. Тяговый электродвигатель (ТЭД) – асинхронный ДТА-1200А с часовой мощностью 1200 кВт. Подвеска тяговых двигателей и редукторов – опорно-рамная с полым валом и поводковыми муфтами [2 – 4]. По классификации работы [5] – тяговый привод 3-го класса.

Электровоз ЭП20 предназначен для вождения пассажирских поездов, масса которых значительно меньше массы грузовых составов. Тем не менее при эксплуатации могут создаваться условия для развития боксования: влажные или замасленные рельсы, необходимость интенсивного разгона на подъеме, сбои в системе управления тягой и пр.

В настоящее время хорошо изучены условия возникновения боксования, разработаны и экспериментально подтверждены методики исследования этих режимов [6 – 11].

При построении математической модели учитывались особенности режимов боксования, конструкция тягового привода, а также условие, чтобы модель была минимальной размерности и сложности и вместе с тем отражала основные интересующие при исследовании свойства реального объекта.

Главной особенностью режимов боксования является то, что оно происходит при малых скоростях движения, когда тяговый момент может достигать максимального момента сцепления, т. е. в том диапазоне скоростей, где на тяговой характеристике предусмотрено ограничение по сцеплению [4, 12].

Поэтому при малых скоростях можно пренебречь вынужденными колебаниями экипажа и ограничиться моделированием только крутильной системы привода. Кроме того, следует иметь в виду, что обнаруженные закономерности, например, развитие фрикционных автоколебаний при скольжении колес, проявятся и при внешнем возмущении.

При боксовании равновесный режим скольжения смещается на падающий участок характеристики сцепления, имеющий отрицательный угол наклона, что может трактоваться как «отрицательное трение» [10 – 12]. В этом случае в приводе возможно развитие противофазных автоколебаний колес с узлом в оси колесной пары. Поэтому колесная пара представлена как две упруго связанные между собой сосредоточенные вращающиеся массы [12].

Трансмиссия (полый вал и две поводковые муфты) между ведомым зубчатым колесом тягового редуктора и колесом колесной пары отражены единой упруго-диссипативной связью. Инерционные свойства полого вала не учитываются. Момент инерции ротора ТЭД первоначально приведен к оси колесной пары.

В целом при построении математической модели приняты допущения, основанные на

опыте ранее выполненных исследований и имеющие экспериментальное подтверждение [6 – 11].

Совмещенные характеристики момента сцепления и тягового момента и расчетная схема динамической системы «тяговый привод – путь» показаны на рисунке 1.

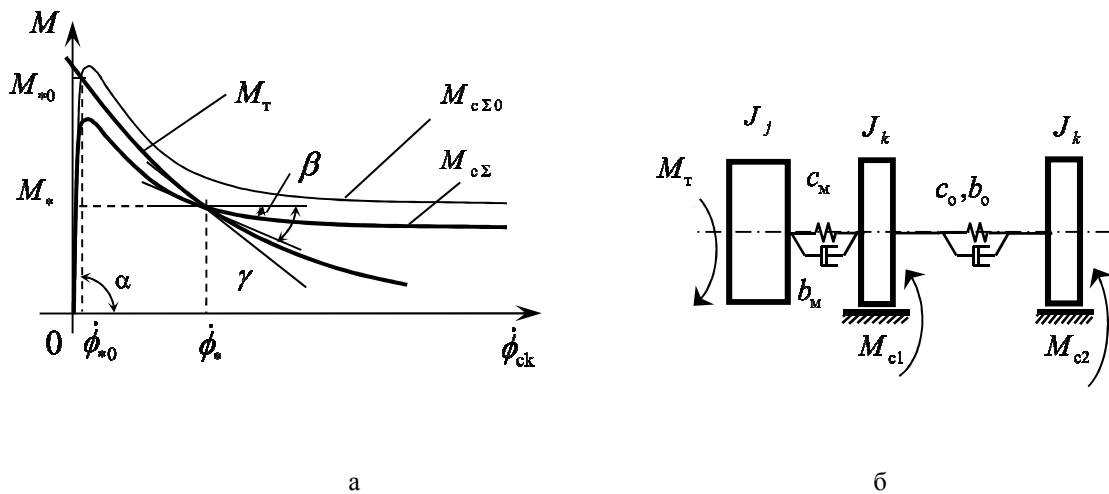


Рисунок 1 – Совмещенные характеристики моментов, действующих на тяговый привод (а), и модель крутильной системы привода (б)

На рисунке 1 характеристики моментов изображены схематично и отражают переход от режима реализации устойчивой тяги ($M_{*0}, \dot{\phi}_{*0}$) к режиму боксования ($M_*, \dot{\phi}_*$).

Движение расчетной модели описывается системой дифференциальных уравнений, полученной с применением принципа Д’Аламбера:

$$\begin{cases} J_j \ddot{\phi}_j + b_m (\dot{\phi}_j - \dot{\phi}_{k1}) + c_m (\phi_j - \phi_{k1}) = M_T(\dot{\phi}_{ck}); \\ J_k \ddot{\phi}_{k1} + b_m (\dot{\phi}_{k1} - \dot{\phi}_j) + c_m (\phi_{k1} - \phi_j) + b_o (\dot{\phi}_{k1} - \dot{\phi}_{k2}) + c_o (\phi_{k1} - \phi_{k2}) = M_{c1}(\dot{\phi}_{k1}); \\ J_k \ddot{\phi}_{k2} + b_o (\dot{\phi}_{k2} - \dot{\phi}_{k1}) + c_o (\phi_{k2} - \phi_{k1}) = M_{c2}(\dot{\phi}_{k2}), \end{cases} \quad (1)$$

где $\phi_j, \phi_{k1}, \phi_{k2}$ – обобщенные угловые координаты динамической системы;

J_j, J_k – соответственно приведенный момент инерции ротора ТЭД и момент инерции колес относительно оси вращения;

c_m, b_m – эквивалентная торсионная жесткость и коэффициент демпфирования двух последовательно соединенных поводковых муфт и полого вала;

c_o, b_o – упругие и диссипативные характеристики оси колесной пары;

$M_{c1}(\dot{\phi}_{k1}), M_{c2}(\dot{\phi}_{k2})$ – моменты сцепления колес рельсами.

Момент сцепления $M_{cs}(\dot{\phi}_{ks})$, приложенный к s-му колесу колесной пары, определяется по выражению

$$M_{cs}(\dot{\phi}_{ks}) = 0,5 R_k \Pi_o \psi_o k(\dot{\phi}_{ks}), \quad (2)$$

где Π_o – осевая нагрузка ($\Pi_o = 21,5 \text{ т} = 211 \text{ кН}$);

R_k – радиус колеса по кругу катания ($R_k = 0,625 \text{ м}$);

$k(\dot{\phi}_{ks}) = \psi / \psi_o$ – безразмерная характеристика, показывающая зависимость отношения мгновенного коэффициента сцепления ψ к его максимальному значению ψ_o от скорости скольжения колеса $\dot{\phi}_{ks}$.

При заданной скорости движения электровоза V , км/ч, значение ψ_0 определяется по известному соотношению [12]:

$$\psi_0 = \psi_0(V) = 0,28 + \frac{4}{50 + 6 \cdot V} - 0,0006 \cdot V. \quad (3)$$

Для определенности в дальнейших расчетах принимаем скорость электровоза

$$V = 5 \text{ км/ч} = 1,39 \text{ м/с}.$$

Для этой скорости движения:

- угловая скорость колесной пары $\omega_V = V / 3,6R_k = 2,22 \text{ с}^{-1}$;
- максимальный коэффициент сцепления из выражения (3) $\psi_0(5) = 0,327$;
- максимальный момент сцепления на одну ось

$$M_c^{\max} = R_k \Pi_0 \psi_0(5) = 0,625 \cdot 211 \cdot 0,327 = 43,12 \text{ кНм}.$$

Безразмерная характеристика сцепления $k(\dot{\phi}_{ck}) = \psi / \psi_0$ аппроксимирована кусочно-линейной функцией – рисунок 2, таблица 1.

В таблице 1 приведены также значения жесткостей (угловых коэффициентов наклона касательных) для различных участков аппроксимации.

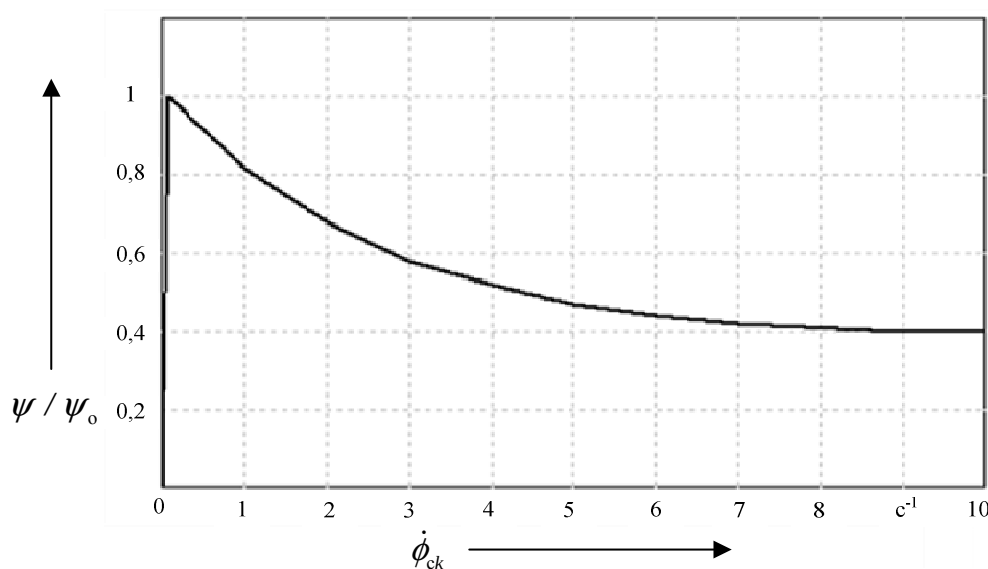


Рисунок 2 – Безразмерная характеристика сцепления

Существует справедливое мнение [10], что для исследования таких нестационарных режимов, как боксование, необходимо рассматривать полную электромеханическую систему «экипаж – тяговый привод – путь».

Таблица 1 – Параметры аппроксимации характеристики сцепления

$\dot{\phi}_{ck}, \text{с}^{-1}$	0	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k(\dot{\phi}_{ck})$	0	1	0,82	0,68	0,58	0,52	0,47	0,44	0,42	0,41	0,40
$dk(\dot{\phi}_{ck}) / d\dot{\phi}_{ck}$	0	10	-0,20	-0,14	-0,10	-0,06	-0,05	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
β , кНмс	0	431,2	-8,624	-6,04	-4,31	-2,59	-2,16	-1,29	-0,86	-0,43	-0,0

Однако это возможно лишь тогда, когда есть полная и достоверная информация о характеристиках силовой схемы, параметрах и настройках системы управления. Необходимо иметь данные хотя бы о квазистатической тяговой характеристике ТЭД. Если этой информации нет, то учет электромагнитных процессов невозможен, а результат таких попыток непредсказуем.

Заметим, что закономерности и свойства, обнаруженные при исследовании только механической модели, проявятся и при работе механической части совместно с любой системой управления [8].

Тяговая характеристика ТЭД зависит от системы управления. Известно, что на электровазе ЭП20 установлены асинхронные ТЭД и астатическая система управления скоростью [2 – 4]. Это значит, что в режиме тяги система управления не допускает угловых колебаний ротора ТЭД относительно его равновесной (заданной) скорости вращения: $\dot{\phi}_j = \dot{\phi}_* = \text{const}$, $\ddot{\phi}_j = 0$.

Следовательно, ротор участвует в крутильных колебаниях только в режиме выбега, в режимах тяги (боксования) и электрического торможения ротор ТЭД можно рассматривать вращающимся с постоянной угловой скоростью, а в динамических координатах (в отклонениях от стационарных значений) – «заземленным» относительно статора.

Таким образом, в различных режимах крутильная система привода будет иметь различную структуру и различные собственные частоты [7].

Вместе с тем допущение о «заземленном» роторе ТЭД позволяет упростить расчетную схему математической модели и уйти от необходимости моделировать не определенные в полной мере электрические процессы в силовых цепях ТЭД и в системе управления.

Параметры крутильной системы, отражающей упрощенную модель привода электроваза ЭП20 для исследования режимов боксования, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры крутильной системы тягового привода

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции колеса отн. оси вращения	J_k	тм ²	0,215
Торс. жесткость двух муфт полого вала	c_m	кНм	1800
Торс. жесткость оси колесной пары	c_o	кНм	12000
Торс. коэф. демпф. двух муфт полого вала	b_m	кНмс	3,6
Торс. коэф. демпф. оси колесной пары	b_o	кНмс	0,5

Для оценки качеств динамической системы необходимо рассмотреть работу осцилляторы, из которых состоит система, т. е. нужно провести частотный анализ исследуемой динамической модели тягового привода.

Исключение из рассмотрения колебаний ротора ТЭД равноценно допущению, что $J_j = \infty$ или $\gamma = \infty$.

Пренебрегая демпфированием, составим, раскроем и приравняем к нулю определитель системы (1), записанной в отклонениях, в которой исключены из рассмотрения колебания ротора:

$$\Delta_{\omega} = \begin{vmatrix} c_m + c_o - \omega^2 J_k & -c_o \\ -c_o & c_o - \omega^2 J_k \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Получаем частотное уравнение (уравнение относительно ω):

$$(c_m + c_o - \omega^2 J_k)(c_o - \omega^2 J_k) - c_o^2 = 0. \quad (5)$$

Подставляя числовые значения величин из таблицы 2 в уравнение (5) и решая его относительно ω , получим:

$$\omega_1 = 63,48 \text{ с}^{-1} = 10,1 \text{ Гц}; \quad \omega_2 = 340,5 \text{ с}^{-1} = 54,2 \text{ Гц}.$$

Принимая коэффициент формы первого (связанного с муфтой) колеса колесной пары за единицу ($\mu_{k1i} = 1$) и следуя процедурам, описанным в работах [10, 14], найдем коэффициент формы второго колеса при колебаниях с i -й собственной частотой по выражению:

$$\mu_{k2i} = \frac{c_m + c_o - \omega_i^2 J_k}{c_o}. \quad (6)$$

Подставляя числовые значения в уравнение (6), получаем: $\mu_{k21} = 1,078$ и $\mu_{k22} = -0,928$.

Найденные собственные частоты и коэффициенты собственных форм позволяют оценить устойчивость привода по отношению к автоколебаниям методом энергетического баланса, описанным в работах [6, 11].

Суть метода состоит в следующем.

Если система находится на границе устойчивости, то из условия энергетического баланса следует, что средняя мощность, подводимая в систему в процессе автоколебаний с i -й собственной частотой, равна средней мощности, рассеиваемой при автоколебаниях [8].

Автоколебания в системах с малой диссипацией близки к гармоническим и происходят с частотами, близкими к собственным частотам колебаний системы. Так как собственные формы колебаний ортогональны, то допустимо составить соотношения энергетического баланса для каждой из собственных форм колебаний отдельно [13, 14].

Влияние диссипативных параметров на собственные частоты и формы пренебрежимо мало, поэтому собственные частоты динамической системы с малой диссипацией можно определять без учета демпфирования.

В работе [6] получено выражение для определения критического демпфирования в муфтах $\bar{b}_{mi}$, при котором динамическая система, аналогичная той, что показана на рисунке 1, находится на границе устойчивости:

$$\bar{b}_{mi} = \frac{\beta_1(\mu_{k1i}^2 + \mu_{k2i}^2) - b_o(\mu_{k1i} - \mu_{k2i})^2 - \gamma\mu_{ji}^2}{(\mu_{ji} - \mu_{k1i})^2}, \quad (7)$$

где γ и $\beta_1 = 0,5\beta$ – соответственно жесткость характеристики ТЭД и характеристики сцепления под каждым из колес в окрестности равновесного режима.

Демпфирование в оси колесной пары пренебрежимо мало, поэтому можно принять $b_o = 0$.

В силу того, что ротор ТЭД принят заземленным, имеем: $\mu_{k1i} = 1$ и $\mu_{ji} = 0$, а выражение (7) принимает вид:

$$\bar{b}_{mi} = \beta_1(1 + \mu_{k2i}^2). \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) найденные ранее значения коэффициентов формы, получим величину граничного демпфирования в муфтах привода, при которой система находится на границе устойчивости по каждой из собственных частот:

$$b_{m1} = \beta_1(1 + 1,078^2) = 2,162 \cdot \beta_1; \quad b_{m2} = \beta_1(1 + 0,928^2) = 1,861 \cdot \beta_1.$$

Учитывая, что $\beta_1 = 0,5\beta$, где β – крутизна характеристики суммарного момента сцепления колесной пары с рельсами, окончательно получим граничное демпфирование при колебаниях с низкой и высокой частотой соответственно: $b_{m1} = 1,08 \cdot \beta$ и $b_{m2} = 0,93 \cdot \beta$.

Из таблицы 2 имеем: $\beta = 8,624 \text{ кНмс}$. Тогда $b_{m1} = 9,31 \text{ кНмс}$ и $b_{m2} = 8,02 \text{ кНмс}$.

Значение коэффициента демпфирования b_m в муфтах привода, приведенное в таблице 1, составляет всего 3,6 кНмс, откуда следует, что для гарантированного исключения автоколебаний необходимо значение b_m увеличить как минимум в три раза.

Для подавления низкочастотных автоколебаний требуется демпфирование примерно на 16 % большее, чем для подавления высокочастотных.

Как именно динамическая система выбирает свою форму движения при выходе на устойчивый автоколебательный режим, описано в работе [7]. Оценка устойчивости возможных предельных циклов выходит за рамки задач, поставленных в данной работе.

Необходимо также иметь в виду, что данные по характеристике сцепления и по параметрам привода следует считать приблизительными. Поэтому окончательные выводы об устойчивости привода можно сделать только по результатам натурных испытаний.

Если автоколебания развиваются вокруг равновесного режима, соответствующего падающему участку, то по мере достижения амплитуды угловой скорости хотя бы одним из колес восходящего участка при дальнейшем ее росте включается фактор интенсивного рассеивания энергии (за счет существенной крутизны восходящего участка), который препятствует дальнейшему росту амплитуды автоколебаний.

Это означает, что наибольшая амплитуда угловой скорости колес при автоколебаниях с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$, по своей величине равна скорости $\dot{\phi}_*$ равновесного режима (см. рисунок 1).

Отсюда следует, что амплитуды динамических нагрузок в элементах динамической системы при автоколебаниях пропорциональны равновесной угловой скорости скольжения колес [13, 14].

Как правило, при выходе на ограничение в автоколебательной системе устанавливается одночастотный режим. Поведение автоколебательных систем при многочастотных установившихся режимах описано в работе [7], где показано, что к мультичастотному устойчивому режиму приходят системы с кратным отношением собственных частот, что встречается крайне редко. В нашем случае собственные частоты не кратны, поэтому необходимо оценивать возможные нагрузки при одночастотных автоколебаниях с каждой из собственных частот.

Если одночастотные автоколебания близки к гармоническим колебаниям, то между амплитудами обобщенных координат и их производными (скоростями) существует известная зависимость $\dot{\phi}_i^{\max} = \omega_i \phi_i^{\max}$, из которой следует соотношение:

$$\phi_{ki}^{\max} = \frac{\dot{\phi}_{ki}^{\max}}{\omega_i} = \frac{\dot{\phi}_*}{\omega_i}. \quad (9)$$

Выражая угловые деформации муфт полого вала и оси колесной пары через обобщенные координаты и коэффициенты формы, нормируя коэффициенты формы к максимальным их значениям для каждой из частот, определим амплитуды соответствующих динамических моментов [14]:

$$\Delta M_{mi} = c_m \phi_k^{\max} = c_m \frac{1}{|\mu|_{ki}^{\max}} \cdot \frac{\dot{\phi}_*}{\omega_i}; \quad \Delta M_{oi} = c_o |\phi_{k1i} - \phi_{k2i}| = c_o \frac{|1 - \mu_{k2i}|}{|\mu|_{ki}^{\max}} \cdot \frac{\dot{\phi}_*}{\omega_i}. \quad (10)$$

Подставляя в выражения (10) числовые значения величин, получим:

– для низкочастотных колебаний $\Delta M_{m1} = 26,3 \cdot \dot{\phi}_*$ кНм и $\Delta M_{o1} = 14,74 \cdot \dot{\phi}_*$ кНм;

– для высокочастотных колебаний $\Delta M_{m2} = 5,29 \cdot \dot{\phi}_*$ кНм и $\Delta M_{o2} = 67,9 \cdot \dot{\phi}_*$ кНм.

Полученный результат свидетельствует о том, что даже при сравнительно небольшой равновесной угловой скорости скольжения $\dot{\phi}_* = 1 \text{ с}^{-1}$ за счет автоколебаний в элементах привода возникают существенные динамические нагрузки.

Так, при низкочастотных автоколебаниях амплитуда динамического момента в упругих

муфтах равна 26,3 кНм, что составляет 60 % от максимального для данной скорости тягового момента – 43,12 кНм.

При высокочастотных автоколебаниях динамический момент в оси колесной пары 67,9 кНм более, чем в три раза превышает максимальный для данной скорости тяговый момент 21,56 кНм.

Если не увеличить демпфирование в муфтах и оставить его на прежнем уровне ($b_m = 3,6$ кНмс), то опасность развития автоколебаний сохранится до скоростей скольжения $\dot{\phi}_{ск} = \dot{\phi}_* = 3...4$ с⁻¹ (см. таблицу 1). Тогда при автоколебаниях возможные нагрузки в элементах привода возрастут в три – четыре раза по сравнению с нагрузками, вычисленными для скорости скольжения $\dot{\phi}_* = 1$ с⁻¹.

Чрезвычайно важным результатом прямого моделирования динамической системы является тот факт, что в системе, неустойчивой одновременно по двум формам колебаний, в начале боксования развиваются обе формы автоколебаний, а при выходе на ограничение (на устойчивый предельный цикл) сохраняется только одна – именно низкочастотная форма.

Объясняется это тем, что инкремент колебаний по низкой частоте выше, чем по высокой частоте. Низкочастотная форма имеет более высокий темп развития, отнесенный к периоду колебаний, и поэтому интенсивнее «захватывает» все энергетические ресурсы системы, выполняемые при автоколебаниях за счет «отрицательного демпфирования» [7, 13].

Этот эффект может быть широко и удачно использован для подавления в системе какой-либо нежелательной формы ее развития.

В данном случае так и происходит – благодаря развитию низкочастотной формы подавляется высокочастотная форма, опасная своими высокими динамическими нагрузками в оси колесной пары. Основным условием формирования указанного эффекта является наличие жесткой астатической системы управления скоростью, не допускающей интенсивных колебаний ротора ТЭД.

Если допустить колебания ротора, то за счет электромагнитных переходных процессов возрастет средняя мощность, рассеиваемая при низкочастотных автоколебаниях. Низкочастотная форма начнет затухать, а для высокочастотной формы энергетический баланс практически не изменится. И тогда «инициатива развития» перейдет к высокочастотным автоколебаниям, сопровождающимся опасными нагрузками в оси колесной пары.

На основе выполненных расчетов можно сформулировать следующие выводы и рекомендации.

1. Причиной высоких динамических нагрузок в элементах тягового привода при боксовании являются фрикционные автоколебания в трансмиссии. Поэтому при исследовании режимов боксования (как теоретических, так и экспериментальных) в первую очередь необходимо оценить устойчивость тягового привода по отношению к автоколебаниям. Уровень демпфирования в упругих элементах привода должен выбираться из условий гарантированного подавления всех возможных форм автоколебаний.

2. Расчеты показали, что коэффициент демпфирования в элементах упругих муфт необходимо увеличить в три раза по сравнению с указанным в исходных данных значением.

3. Величина динамических нагрузок пропорциональна равновесной угловой скорости скольжения колес. Следовательно, для снижения этих нагрузок необходимо уменьшать максимальную равновесную скорость скольжения колес.

4. Кардинальной мерой снижения нагрузок в элементах тягового привода в нестационарных режимах является исключение режима боксования как такового.

5. При создании системы управления тягой следует учитывать динамические свойства трансмиссии и особенности фрикционного контакта колес с рельсами.

Список литературы

1. Электровозы нового поколения. Виртуальная тематическая подборка [Текст] / Дорожная научно-техническая библиотека СКЖД – филиала ОАО «РЖД». – Ростов-на-Дону, 2013. – 27 с.
2. Руководство по эксплуатации Книга 1. Электровоз магистральный ЭП20 Описание и работа. Электрические схемы. ЗТС.085.003 РЭ1 [Текст] / ООО «ТРТранс». – Новочеркасск, 2012. – 297 с.
3. Руководство по эксплуатации Книга 3. Электровоз магистральный ЭП20 Описание и работа. Электрические машины. ЗТС.085.003 РЭ3 [Текст] / ООО «ТРТранс». – Новочеркасск, 2012. – 115 с.
4. Руководство по эксплуатации Книга 7. Электровоз магистральный ЭП20 Описание и работа. Механическая часть. ЗТС.085.003 РЭ7 [Текст] / ООО «ТРТранс». – Новочеркасск, 2012. – 56 с.
5. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог [Текст] / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
6. Коропец, П. А. Метод оценки устойчивости упругих систем с малой диссипацией [Текст] / П. А. Коропец // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2016. – № 1. – С. 32 – 41.
7. Коропец, П. А. Динамика и устойчивость механических систем с трением [Текст] / П. А. Коропец // Сборник авторских статей. – Lambert Academic Publishing, 2012. – 138 с.
8. Коропец, П. А. Прогнозирование боксования колесных пар подвижного состава [Текст] / П. А. Коропец / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2012. – 165 с.
9. Коропец, П. А. Снижение динамических нагрузок в оси колесной пары локомотивов с опорно-рамным приводом при боксовании [Текст] / П. А. Коропец // Тезисы докладов всесоюзной науч.-техн. конф. «Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности» / Ворошиловгр. маш. ин-т. – Ворошиловград, 1985. – 231 с.
10. Павленко, А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов [Текст] / А. П. Павленко. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
11. Павленко, А. П. Динамические напряжения в колесной паре локомотива при нарушении контакта колес с рельсами [Текст] / А. П. Павленко, П. А. Коропец // Материалы II междунард. трибологического симпозиума. – ПНР, Краков. – 1986. – С. 413 – 418.
12. Деев, В. В. Тяга поездов [Текст] / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М.: Транспорт, 1987. – 264 с.
13. Ланда, П. С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы [Текст] / П. С. Ланда. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1980. – 360 с.
14. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний [Текст] / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1980. – 272 с.

References

1. *Elektrovozy novogo pokoleniya. Virtual'naya tematicheskaya podborka* (New generation electric locomotives. Virtual thematic selection). Rostov-na-Dony: Dorozh-naya nauchno-tekhnicheskaya biblioteka SKZHD – filiala OAO «RZHD», 2013. 27 p.
2. *Rukovodstvo po ekspluatatsii Kniga 1. Elektrovoz magistral'nyy EP20 Opisaniye i rabota. Elektricheskiye skhemy. ZTS.085.003 RE1* (The user manual for Book 1. The mainline electric locomotive EP20 Description and operation. Electrical circuit. ZTS.085.003 RE1). LLC «Trtrans». Novocherkassk, 2012. 297 p.
3. *Rukovodstvo po ekspluatatsii Kniga 3. Elektrovoz magistral'nyy EP20 Opisaniye i rabota. Elektricheskiye mashiny. ZTS.085.003 RE3* (Operating manual Book 3. The mainline electric locomotive EP20 Description and operation. Electric machine. ZTS.085.003 RE3). LLC «Trtrans». Novocherkassk, 2012. 115 p.

4. Rukovodstvo po ekspluatatsii Kniga 7. Elektrovoz magistral'nyy EP20 Opisaniye i rabota. Mekhanicheskaya chast'. ЗТС.085.003 RE7 (Operating manual Book 7. The mainline electric locomotive EP20 Description and operation. Mechanical part. ЗТС.085.003 RE7). LLC «Trtrans». Novocherkassk, 2012. 56 p.
5. Biryukov I. V. *Tyagovyye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznnykh do-rog* (Traction transmission of electric rolling stock of Railways). Moscow: Transport, 1986. 256 p.
6. Koropets P. A. Method of estimation of stability of elastic systems with small dissipation [Metod otsenki ustoychivosti uprugikh sistem s maloy dissipatsiyey]. *Vestnik RGUPS*. Rostov-na-Donu. 2016. no 1. pp. 32 – 41.
7. Koropets P. A. *Dinamika i ustoychivost' mekhanicheskikh sistem s treniyem* (Dynamics and stability of mechanical systems with friction). Sbornik avtorskikh statey. Lambert Academic Publishing, 2012. 138 p.
8. Koropets P. A. *Prognozirovaniye boksovaniya kolesnykh par podvizhnogo sostava* (Forecasting of rolling stock wheel pairs Boxing). Roszheldor, Rost. gos. un-t putey soobshch. Rostov-na-Donu: RGUPS, 2012. 165 p.
9. Koropets P. A. *Snizheniye dinamicheskikh nagruzok v osi kolesnoy pary lokomotivov s oporno-ramnym privodom pri boksovanii* (Reduction of dynamic loads in the axle of the locomotive wheelset with the support frame drive during Boxing). Voroshilovgrad. 1985. p. 231.
10. Pavlenko A. P. *Dinamika tyagovykh privodov magistral'nykh lokomotivov* (Dynamics of traction drives of main locomotives). Moscow: Mashinostroyeniye, 1991. 192 p.
11. Pavlenko A. P. *Dinamicheskiye napryazheniya v kolesnoy pare lokomotiva pri narushenii kontakta koles s rel'sami* (Dynamic stresses in the locomotive wheelset in case of violation of contact between the wheels and the rails). Krakov. 1986. pp. 413 – 418.
12. Deyev V. V., Il'in G. A., Afonin G. S. *Tyaga poyezdov* (Train pull). Moscow: Transport, 1987. 264 p.
13. Landa P. S. *Avtokolebaniya v sistemakh s konechnym chislom stepeney svobody* (Self-oscillations in systems with a finite number of degrees of freedom). Moscow: Nauka. 1980. 360 p.
14. Panovko Ya. G. *Introduction to the theory of mechanical oscillations* (Introduction to the theory of mechanical vibrations). Moscow: Nauka, 1980. 272 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коропец Петр Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского стрелкового полка народного ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрический подвижной состав», РГУПС.

Тел.: +7-951-831-68-24.

E-mail: vega99@front.ru

Хачкинаян Степан Аликович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского стрелкового полка народного ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электрический подвижной состав», РГУПС.

Тел.: +7-928-156-17-22.

E-mail: hsa500@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koropets Peter Alexeyevich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Electric rolling stock» RSTU.

Tel: +7-951-831-68-24.

E-mail: vega99@front.ru

Khachkinayan Stepan Alikovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Senior Lecturer of the department «Electric rolling stock» RSTU.

Tel: +7-928-156-17-22.

E-mail: hsa500@yandex.ru

Кашуба Александр Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

Ростовского стрелкового полка народного ополчения пл., д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрический подвижной состав», РГУПС.

Тел.: +7-952-605-60-66.

E-mail: kashuba-av@mail.ru

Kashuba Alexander Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Postgraduate of the department «Electric rolling stock» RSTU.

Tel: +7-952-605-60-66.

E-mail: kashuba-av@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Коропец, П. А. Динамические процессы в тяговом приводе электровоза ЭП20 в режиме боксования [Текст] / П. А. Коропец, С. А. Хачкина, А. В. Кашуба // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 38 – 48.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Koropets P. A., Khachkinayan S. A., Kashuba A. V. Dynamic processes in the traction drive of the electric locomotive EP20 in sliding mode Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 38 – 48 (In Russian).

УДК 629.4.047.8

Ю. И. Матыш, И. А. Гаджиев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА НА ХОДУ ПОЕЗДА

Аннотация. В статье рассмотрена актуальность проблемы создания бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона, обозначены недостатки существующих средств диагностирования. Проведен патентный поиск источников электрической энергии для грузовых вагонов, определены их особенности. Предложена авторская конструкция устройства электропитания для диагностирования технического состояния грузового вагона на ходу поезда.

Ключевые слова: грузовой вагон, перевозки грузов, система диагностирования, источники электропитания, безопасность движения.

Yuriy I. Matyash, Ibragim A. Gadzhiev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL SUPPLY DEVICE FOR ON-BOARD SYSTEM OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION RAILWAY CAR DURING MOVEMENT OF THE TRAIN

Abstract. The article considers the urgency of the problem of creating an on-board system of diagnosing the technical condition of railway car, the shortcomings of the existing diagnostic tools are indicated. Patent search of electric power sources for freight wagons has been carried out, their features have been determined. The author's design of the power supply device is proposed to diagnose the technical condition of railway car on the trip.

Keywords: railway car, freight transportation, diagnostic system, power supplies, traffic safety.

В настоящее время в России эксплуатируется свыше 1 млн грузовых вагонов [1], обеспечивающих грузооборот, равный 2492,9 млрд ткм, что составляет 45,5 % от общего грузооборота в стране по данным за 12 месяцев 2017 г. [2]. Помимо этого в 2014 г. стратегией развития холдинга «РЖД» в роли одной из приоритетных поставлена задача по увеличению пере-

возок грузов к 2030 г. на 500 – 800 млн т [3]. Как следствие, появляется тенденция к увеличению веса и длины грузовых поездов, что делает актуальной тему их автоведения, т. е. частичного или полного автоматического (без непосредственного постоянного участия машиниста) управления поездом. Вместе с тем одной из действенных мер повышения эффективности перевозочного процесса в интересах клиента является организация движения грузовых поездов по расписанию [4].

Все это является непосредственной предпосылкой к дальнейшей интенсификации грузоперевозочного процесса, что в свою очередь приведет к повышенному износу вагонного парка и увеличению риска возникновения неисправностей. На рисунке 1 приведена статистика отцепки вагонов по причине выявления неисправности их узлов, которая говорит о том, что несмотря на существующие организационно-технические мероприятия, направленные на снижение количества случаев отказа узлов вагонов, динамика количества отцепок за последние три года остается практически на одном уровне, за исключением колесных пар, где имеется существенное снижение числа отцепок. Для автосцепок и автотормозов, напротив, имел место небольшой рост отцепок по сравнению с 2015 г.

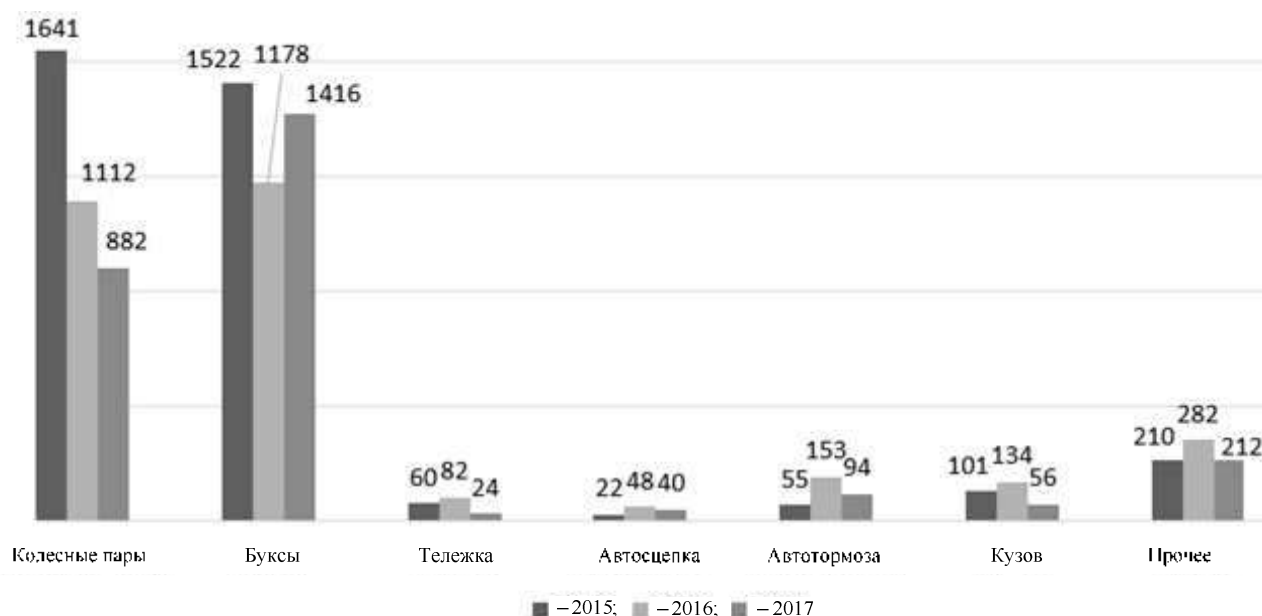


Рисунок 1 – Отцепка вагонов на конечных станциях гарантийных участков с 2015 по 2017 г. по ВЧД-25 Новокузнецк

Помимо этого в соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» планируется к 2030 г. организовать производство грузового подвижного состава нового поколения с осевой нагрузкой 25 – 30 тс и скоростью движения до 140 км/ч [3]. При учете перспективы эксплуатации поездов повышенной массы и длины произойдет увеличение кинетической энергии движущегося состава, что приумножит риск возникновения неисправностей.

В складывающейся ситуации, когда, с одной стороны, происходит возрастание нагрузки на грузовой подвижной состав, а с другой – увеличение гарантийных плеч, существующий «точечный» контроль напольными и постовыми средствами диагностирования становится недостаточным, так как существующие системы и комплексы не способны непрерывно сообщать актуальную информацию о техническом состоянии грузовых вагонов на протяжении всего маршрута следования поезда.

Из этого можно сделать вывод о том, что вопрос разработки бортовой системы диагностирования как неотъемлемой части грузового вагона становится актуальным. Развитие гру-

зового подвижного состава в данном направлении согласуется с концепцией проекта «Цифровая железная дорога», целью которого является создание единого информационного комплекса взаимосвязанных систем обработки данных и систем автоматики в управлении перевозками. Данный проект будет реализовываться не только на уровне ОАО «РЖД», но и на уровне почти 100 стран, входящих в Международный союз железных дорог (UIC) [5].

За рубежом уже используются подобные устройства, например, бортовой датчик температуры буксового узла Wagon Tracker, а в России разработан и проходит испытания его аналог [7]. Оба устройства содержат в себе генератор электрической энергии, без которого не представляется возможным создание бортовой системы диагностирования грузового вагона.

Для определения преимуществ и недостатков известных генераторов для вагонов были проведены патентные исследования, в результате которых установлено, что физический принцип работы большинства устройств заключается в преобразовании механической энергии вращения колесной пары в электрическую за счет электромагнитной индукции [6, 7].

Несмотря на то, что в России подобный подход получил широкое распространение на пассажирских вагонах, для целей диагностирования технического состояния грузового вагона он нецелесообразен по следующим причинам:

- 1) «привязка» к колесной паре, отсутствие возможности варьировать место расположения генератора на вагоне в зависимости от удаленности диагностируемого узла;
- 2) усложнение технического обслуживания колесной пары и тележки.

В процессе исследований было рассмотрено устройство, осуществляющее свою работу по принципу преобразования солнечной энергии в электрический ток, но данный способ имеет низкую эффективность в районах России, характеризующихся малой продолжительностью светового дня, а также при загрязнении светопоглощающей поверхности снегом и пылью [8].

С учетом указанных особенностей в целях обеспечения бортовой системы диагностирования достаточным количеством электрической энергии авторами была начата разработка устройства электропитания, принцип которого заключается в преобразовании механической энергии колебания кузова вагона, возникающей в процессе движения грузового вагона по рельсовому пути, в электрическую [9, 10].

В результате после ряда усовершенствований было разработано устройство электропитания бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона, изображенное на рисунке 2, которое состоит из зарядного устройства с батареей 1, пружины 2, штока с зубчатой рейкой 3, редуктора 4, храпового механизма 5 и генераторной части 6.

Принцип работы устройства заключается в следующем: при движении грузового вагона по рельсовой колее происходят колебания его кузова, которые обусловлены микронеровностями на поверхности колес и рельсов, разностью диаметров колес, неравномерной жесткостью балластного слоя железнодорожного пути и др., и, как следствие, происходят колебания самого устройства электропитания, жестко закрепленного на раме вагона. В результате этого подпружиненный шток 3 начинает совершать возвратно-поступательные движения, которые через редуктор 4 приводят во вращение вал генераторной части 6, что в свою очередь обуславливает наведение ЭДС в катушках. Использование в конструкции храпового механизма 5 обеспечивает одностороннее вращение вала. Для накопления получаемой электрической энергии предусмотрена аккумуляторная батарея с зарядным устройством 1.

В настоящее время на грузовых вагонах для регулирования силы нажатия тормозных колодок используется авторежим 3, изображенный на рисунке 3, для работы которого предусмотрена жестко закрепленная на боковых рамах 2 тележки балочка 7 с размещенной на ней планкой 6. Благодаря этому пропадает необходимость в установке дополнительного оборудования на тележку, т. е. устройство электропитания 5 жестко закрепляется на кронштейне, приваренном к хребтовой балке рамы вагона 4. Таким образом, закрепление на подрессорен-

ной части вагона обеспечит совместное перемещение устройства и кузова при изменении прогиба рессорного подвешивания 1.

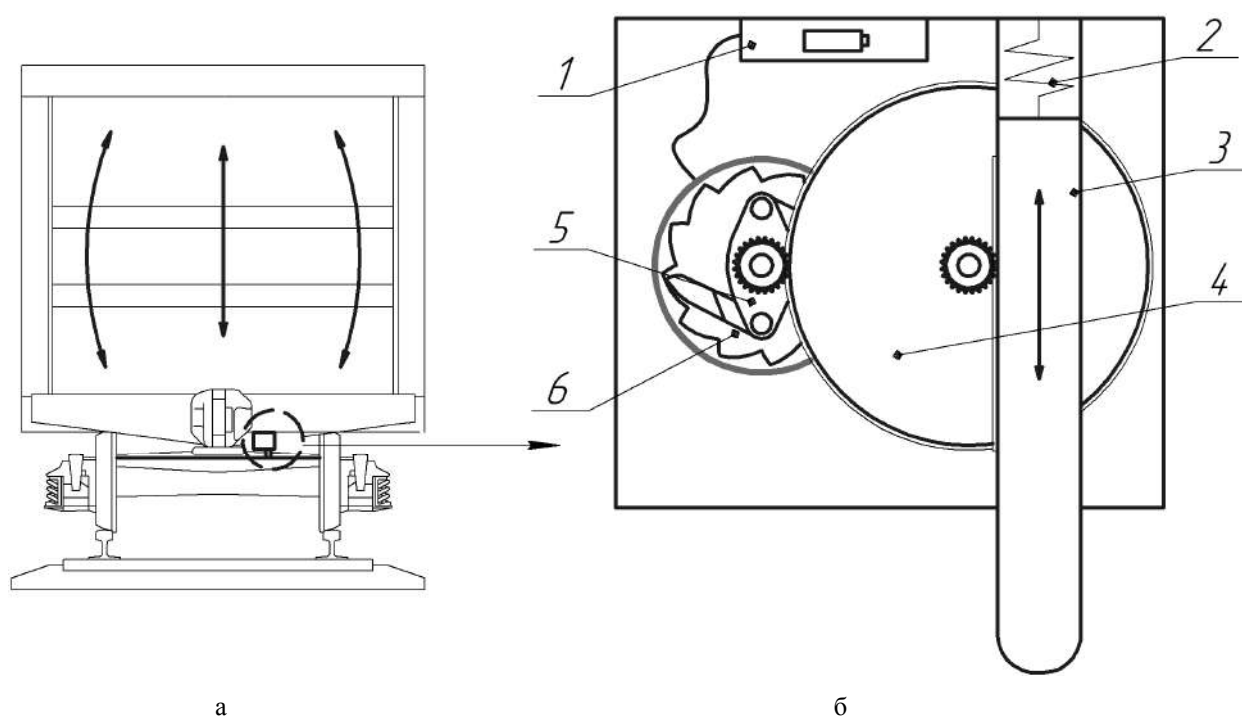


Рисунок 2 – Схема устройства электропитания для диагностирования технического состояния грузового вагона

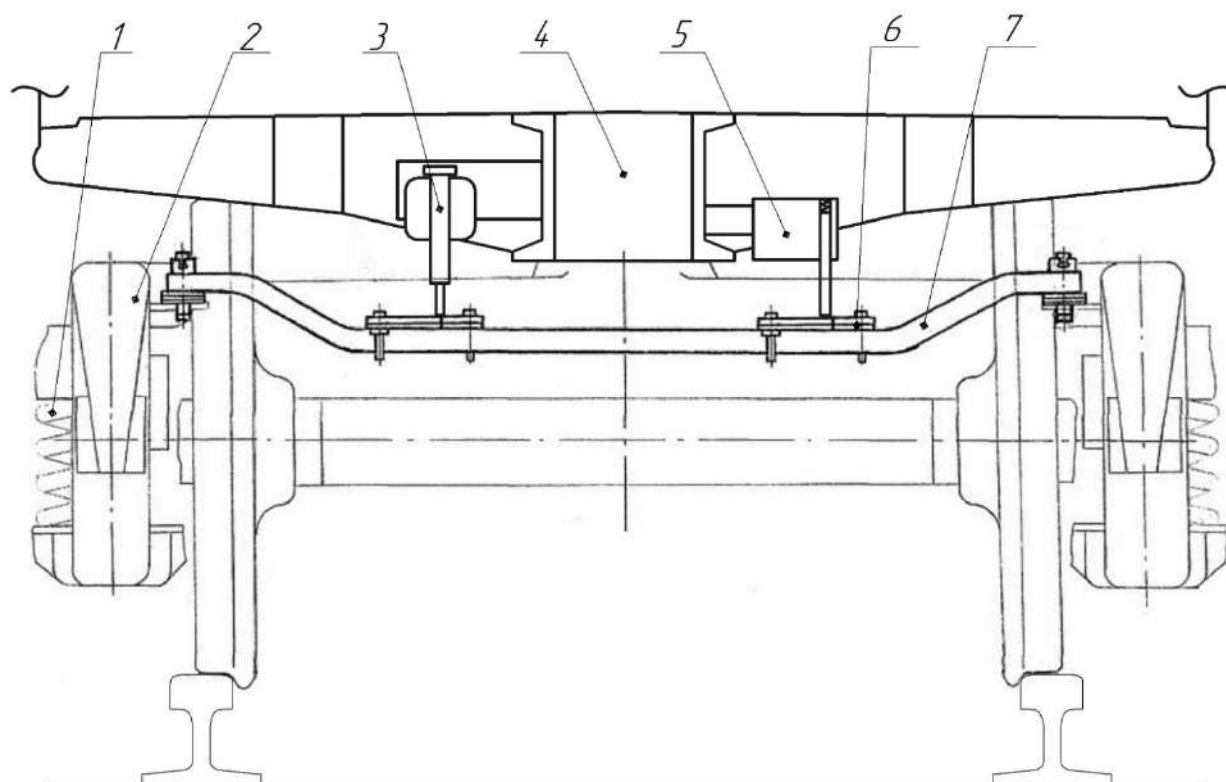


Рисунок 3 – Схема взаимодействия устройства электропитания с элементами вагона

Конструкция генераторной части, изображенная на рисунке 4, состоит из статора с обмоткой 1, ротора 2 с магнитами 4, храпового механизма 3. Для повышения выходной мощности устройства предлагается использовать статор с трехфазной обмоткой, а в конструкции ротора применить неодимовые магниты, которые в отличие от ферритовых магнитов характеризуются более высокими магнитными свойствами, такими как остаточная магнитная индукция и коэрцитивная магнитная сила.

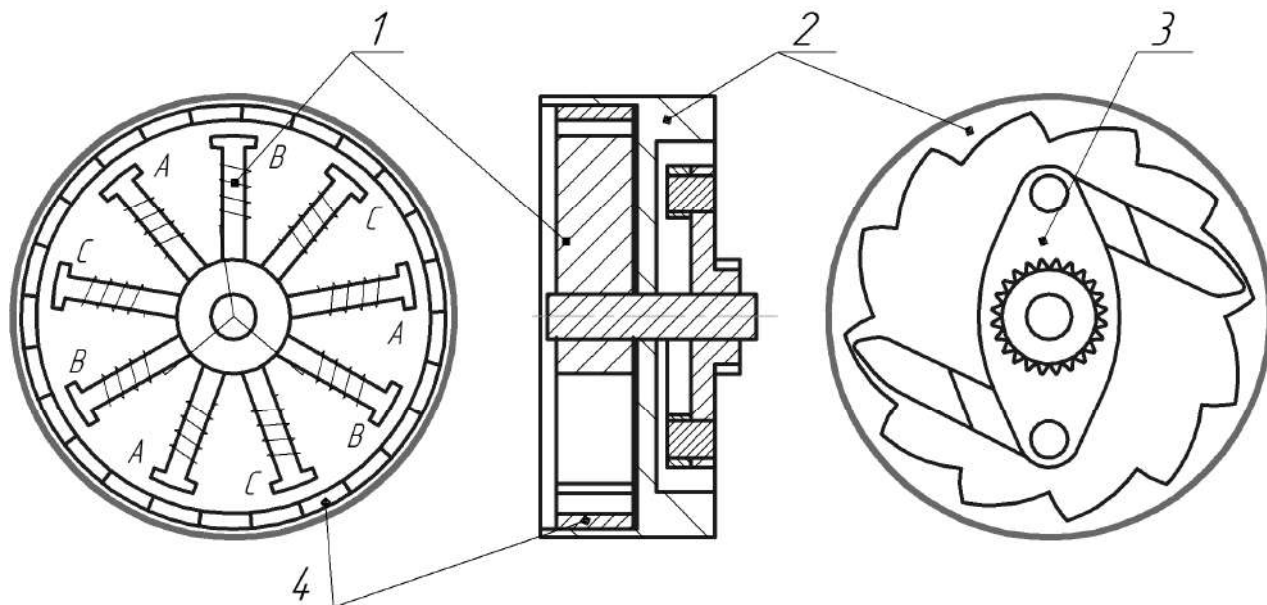


Рисунок 4 – Схема конструкции генераторной части

Для оценки мощности генератора 1 рассчитывается мощность колебаний кузова вагона N , Вт:

$$N = \frac{F \cdot 2S}{1/\nu}, \quad (1)$$

где F – сила, действующая на шток генератора, Н;

S – амплитуда колебаний кузова, м;

ν – частота колебаний кузова, с^{-1} .

Расчет силы F произведем для вагона с осевой нагрузкой 23,5 тс и грузоподъемностью 69,5 тс по формуле 2, Н:

$$F = \frac{P + T - n \cdot P_{\text{тел}} + n \cdot P_{\text{ч}}}{i} g, \quad (2)$$

где P – грузоподъемность вагона, кгс;

T – тара вагона, опирающегося на тележку, кгс;

n – число тележек под вагоном;

$P_{\text{тел}}$ – вес тележки, равный 4750 кгс;

$P_{\text{ч}}$ – вес частей тележки, находящихся над пружинами, равный 443 кгс;

i – число точек опор кузова;

g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

С учетом дополнительного опирания кузова на шток генератора подставим числовое значения в формулу (2):

$$F = \frac{69500 + 24500 - 2 \cdot 443 + 2 \cdot 4750}{3} \cdot 9,81 = 279212,2 \text{ Н.}$$

Исходя из типового расчета рессорного подвешивания вагона частоту колебаний кузова ν примем равной $2,46 \text{ с}^{-1}$, амплитуду S равной $0,01 \text{ м}$ [11]. Подставив числовые значения в формулу (1), рассчитаем максимальную мощность, передаваемую на шток:

$$N = \frac{279212,2 \cdot 2 \cdot 0,01}{1 / 2,46} = 13620,1 \text{ Вт.}$$

Рассчитанное значение отражает теоретический верхний предел мощности, которую можно получить от колебаний кузова грузового вагона, тогда как оценочное потребление бортовой системы диагностирования не более 5 Вт.

Следовательно, даже с учетом потерь мощности в редукторе и потерь при преобразовании механической энергии в электрическую в генераторной части предложенное устройство обеспечивает получение необходимого количества энергии для работы бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона в процессе движения поезда, что создает условия для расширения спектра выявляемых неисправностей узлов вагона, что особенно важно для обеспечения безопасности движения поездов повышенной массы и длины.

Список литературы

1. Раскрытие информации ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] / ОАО «РЖД». – Режим доступа: http://rzd.ru/openinfo/public/ru?STRUCTURE_ID=5131&archive=1&textSearch=&formid=28&year_id=2018, свободный (дата обращения: 03.03.2018).
2. Транспорт: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: http://www.gks.ru/free_dos/new_site/business/trans-sv/osnpoktr2015-17.xls, свободный (дата обращения: 03.03.2018).
3. Стратегия развития до 2030 года – Стратегия холдинга «РЖД» – Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2015 г. [Электронный ресурс] // Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2015 г. – Режим доступа: <http://ar2015.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030/>, свободный (дата обращения: 03.03.2018).
4. Комплексная программа поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на 2011 – 2015 гг. [Электронный ресурс] // Железнодорожные документы. – Режим доступа: <https://jd-doc.ru/2011/iyun-2011/5571-kompleksnaya-programma-poetapnogo-perekhoda-na-organizatsiyu-dvizheniya-gruzovykh-poezdov-po-raspisaniyu-na-2011-2015-gg-ot-10-06-2011-n-143>, свободный (дата обращения: 03.03.2018).
5. A global vision for railway development [Электронный ресурс] // UIC – International union of railways. The worldwide railway organization. – Режим доступа: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf, свободный (дата обращения: 03.03.2018).
6. Пат. 2578701 Российская Федерация, МПК В 61 D 43/00. Способ и устройство автономного электроснабжения аппаратуры железнодорожного вагона [Текст] / Гнисько Р. В., Курганский А. А., Ляной В. В., Тильк И. Г. – 2014148002/11; заявл. 27.11.2014; опубл. 27.03.2016.
7. Пат. WO2010028417 A1 Австрия, МПК B61D43/00. Wheelset bearing housing having a position detection device for a rail vehicle and rail vehicle equipped therewith / Zeller Reinhard, Petschnig Guenter, Joch Martin № PCT/AT2009/000333; заявл. 27.08.2009; опубл. 18.03.2010.
8. Пат. 140805 Российская Федерация, МПК В 61 К 9/00. Зарядное устройство блока хвостового грузового вагона [Текст] / Кучеренко В. К., Сергеев Б. Б., Сергеев П. Б., Шлома Д. Н., Черников Е. А. – 2013136074/11; заявл. 31.07.2013; опубл. 20.05.2014.

9. Пат. 173915 Российская Федерация, МПК В 61 К 9/00. Устройство электропитания для диагностирования технического состояния грузового вагона [Текст] / Матяш Ю. И., Родченко А. Д., Гаджиев И. А., Кондратенко Е. В., Ададуров А. С., Григоришин К. Е. – 2017101911; заявл. 20.01.2017; опубл. 19.09.2017.

10. Матяш, Ю. И. Разработка автономного источника электропитания бортовой системы диагностирования технического состояния грузовых вагонов [Текст] / Ю. И. Матяш, И. А. Гаджиев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 43 – 47.

11. Модернизация четырехосного вагона-хоппера модели 19-X051. Расчет рессорного подвешивания [Электронный ресурс] // Современное развитие транспорта – TrMotion.ru. – Режим доступа: <http://www.trmotion.ru/mijs-662-5.html>, свободный (дата обращения: 28.04.2018).

References

1. Raskrytie informacii OAO «RZHD» [Disclosure of Information by JSC «Russian Railways»]. Access mode: http://rzd.ru/openinfo/public/ru?STRUCTURE_ID=5131&archive=1&textSearch=&form_id=28&year_id=2018, free (accessed: 03.03.2018)

2. Transport: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. [Transport::Federal State Statistics Service]. Access mode: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/trans-sv/osnpoktr2015-17.xls, free (accessed: 03.03.2018)

3. Strategiya razvitiya do 2030 goda – Strategiya holdinga «RZHD» – Godovoj otchet OAO «RZHD» za 2015 g. [Development Strategy until 2030 – The Strategy of RZD Holding – Annual Report of Russian Railways for 2015]. Access mode: <http://ar2015.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030/> free (accessed: 03.03.2018)

4. Kompleksnaya programma poehtapnogo perekhoda na organizaciyu dvizheniya gruzovykh poezdov po raspisaniyu na 2011 – 2015 [Integrated program for the phased transition to the organization of the movement of freight trains on a schedule for 2011 – 2015]. Access mode: <https://jd-doc.ru/2011/iyun-2011/5571-kompleksnaya-programma-poetapnogo-perekhoda-na-organizatsiyu-dvizheniya-gruzovykh-poezdov-po-raspisaniyu-na-2011-2015-gg-ot-10-06-2011-n-143>, free (accessed: 03.03.2018)

5. A global vision for railway development. Access mode: https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf, free (accessed: 03.03.2018)

6. Gnit'ko R. V., Kurganskij A. A., Lyanoj V. V., Til'k I. G. *Patent RU 2578701*, 27.03.2016.

7. Zeller R., Petschnig G., Joch M. *Patent AT WO2010028417 A1*, 18.03.2010.

8. Kucherenko V. K., Sergeev B. B., Sergeev P. B., Shloma D. N., Chernikov E. A. *Patent RU 140805*, 20.05.2014.

9. Matyash Yu. I., Rodchenko A. D., Gadzhiev I. A., Kondratenko E. V., Adadurov A. S., Grigorishin K. E. *Patent RU 173915*, 19.09.2017.

10. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A. Development of an autonomous power source for the on-board diagnostic system for the technical condition of freight cars [Razrabotka avtonomnogo istochnika elektropitaniya bortovoj sistemy diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov]. *Materialy nauchnoi konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific conference «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2017. pp. 43 – 47.

11. Modernizacija chetyrehosnogo vagona-hoppera modeli 19-H051. Raschjot ressnogo podveshivaniya [Modernization of a four-axle wagon-hopper model 19-X051. Calculation of spring suspension]. Access mode: <http://www.trmotion.ru/mijs-662-5.html>, free (accessed: 04.04.2018)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матяш Юрий Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны», ОмГУПС.

Тел.: +7 (960) 990-13-89.

E-mail: matiash41@mail.ru

Гаджиев Ибрагим Азимович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Вагоны», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 766-56-00.

E-mail: ibragimgadziev@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Матяш, Ю. И. Совершенствование устройства электропитания для бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона на ходу поезда [Текст] / Ю. И. Матяш, И. А. Гаджиев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – №1(33). – С. 48 – 55.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matyash Yuriy Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Cars and carriage economy», OSTU.

Phone: +7 (960) 990-13-89

E-mail: matiash41@mail.ru

Gadzhiev Ibragim Azimovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Graduate student of the department «Cars and carriage economy», OSTU.

Phone.: +7 (923) 766-56-00

E-mail: ibragimgadziev@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Matyash Y. I., Gadzhiev I. A. Development of electrical supply device for on-board system of diagnosing the technical condition railway car during movement of the train. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 48 – 55 (In Russian).

УДК 629.4.083

В. А. Минаков, М. А. Сорокина

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА ДИЗЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Очистка моторного масла от загрязняющих его частиц и продуктов износа деталей является неотъемлемой частью надежной эксплуатации трущихся деталей дизелей локомотивов. Наличие твердых частиц в масле ведет к абразивному износу деталей и, как следствие сокращает их ресурсопригодность. Бортовые системы очистки, применяемые на локомотивах, не способны осуществлять мелкодисперсную очистку моторного масла. Предлагается использование внешней стационарной установки центробежных очистителей, что позволит повысить эффективность очистки и осветления моторного масла на плановых видах ремонта и технического обслуживания локомотивов.

Ключевые слова: дизель, очистка моторного масла, фильтрация масла, локомотив, центробежный фильтр, абразивный износ.

Vitaliy A. Minakov, Marina A. Sorokina

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

IMPROVING THE QUALITY OF PURIFICATION LOCOMOTIVE ENGINE OIL

Abstract. Cleaning of engine oil from contaminating particles and products of wear of parts is an integral part of reliable operation of friction parts of locomotive diesels. The presence of solid particles in the oil leads to abrasive wear of the parts, and as a result reduces their resourceability. Onboard cleaning systems used on locomotives are not

able to carry out fine-dispersed cleaning of engine oil. It is proposed to use an external stationary installation of centrifugal cleaners, which will increase the efficiency of cleaning and clarification of engine oil in the planned types of repair and maintenance of locomotives.

Keywords: diesel, purification of engine oil, oil filtration, locomotive, centrifugal filter, abrasive wear.

При работе дизельного двигателя моторное масло загрязняется продуктами износа деталей, продуктами неполного сгорания и пыли. Будучи загрязненным, масло, предназначенное для отвода тепла от деталей и снижения трения, само начинает ускорять процесс изнашивания контактируемых деталей.

Проблемы износа, трения и смазки в машинах является областью трибологических исследований. Прикладными задачами таких исследований являются повышение износостойкости и управление трением за счет применения новых конструкций узлов, материалов и эксплуатационных приемов.

Процесс изнашивания происходит в форме отделения от поверхностей трения мелких частиц материала, что с течением времени приводит к изменению размеров и формы контактирующих деталей. Следует иметь в виду, что изнашивание является сложным многоуровневым процессом. Согласно ГОСТ 23.002-78 результатом изнашивания деталей является их износ [1, 2].

Скорость изнашивания определяют как отношение величины износа (объема, массы) к наработке (время, пробег): $J = \Delta h/t$. Также широко используется характеристика изнашивания – интенсивность изнашивания $J = \Delta h/L$, где L – путь трения.

В двигателях внутреннего сгорания наблюдают три вида износа: коррозионный, контактный и абразивный. Абразивный износ наступает из-за действия твердых частиц [4].



Рисунок 1 –
Контрактируемые детали

В дизелях данный вид износа происходит при контакте трущихся деталей, разделенных масляным слоем с наличием в нем твердых частиц (рисунок 1). Эти частицы (в зависимости от размера, твердости, формы, прочности) разрушаются или вдавливаются в контролируемые детали, нарушая их геометрические размеры. Поэтому крайне важно поддерживать масло в чистом состоянии, своевременно улавливать и удалять посторонние частицы [3].

Для минимизации абразивного износа необходимо учитывать размер загрязняющих примесей и их влияние на интенсивность изнашивания деталей. Согласно результатам исследования [2] интенсивность износа деталей повышается при увеличении размера частиц абразива до тех пор, пока он не достигнет значения 30 – 40 мкм. Это объясняется тем, что частицы, попадая между трущимися поверхностями деталей, измельчаются, образуя большее количество частиц меньшего размера.

При взаимодействии трущихся деталей с абразивными частицами на их поверхности возникают царапины. Выступы абразивных частиц закруглены и могут быть помимо угла заострения охарактеризованы радиусом закругления; если отношение глубины внедрения абразивной частицы в поверхность контактируемой детали к радиусу ее закругления h/r достигает определенного значения, то происходит образование стружки.

Величина критического значения h/r перехода к образованию стружки зависит от величины касательного напряжения на фрикционном контакте предела текучести [4 – 6]:

$$\frac{h}{r} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right), \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение;

σ_T – предел текучести при фрикционном контакте деформируемого материала трения.

Абразивный износ возникает в условиях трения, когда более твердая шероховатая поверхность скользит по более мягкой, царапает или пропахивает ее, образуя свободные частицы. Абразивный износ может возникнуть и тогда, когда твердые частицы попадают между поверхностями фрикционной связи и изнашивают их

Так как при контакте абразивные частицы имеют слабое закрепление, происходит упругое и пластическое деформирование поверхностного слоя (рисунок 2). Это приводит к нанесению на контактируемые поверхности вибрационно-ударных царапин. Разрушительное действие определяется прочностью абразивных частиц.

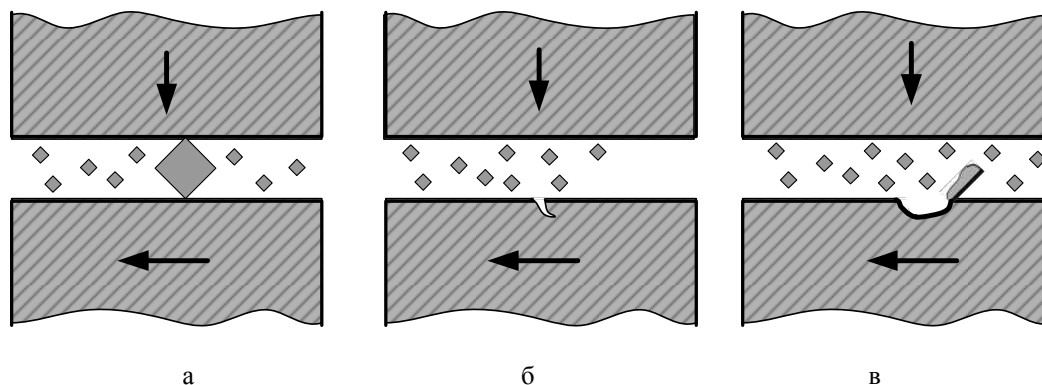


Рисунок 2 – Контакт трущихся деталей при наличии абразивных частиц

Изнашивание абразивными частицами, как правило, сопровождается образованием своеобразных стружек, вытянутых углублений на разрушаемой контактируемой поверхности и усталостными эффектами.

Для определения объемного износа с небольшими нагрузками контактируемых деталей с наличием прочного и твердого абразива можно применить выражение, описанное в работе [3], мкм/ч:

$$U_v = k \frac{Nsd}{HV_o}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от абразивных свойств поверхности;

N – нагрузка;

s – путь трения;

d – размер абразивных частиц;

HV_o – начальная твердость металла на вдавливание.

Для тяжелонагруженных контактирующих деталей объемный износ складывается из условий абразивного износа, физико-механический свойств материалов, геометрических и кинематических параметров сопряжений [6]:

$$U_1 = 4 \cdot 10^2 \frac{q^{2/3} R^{1/2} \sigma^{2.5} \sqrt{\rho} \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}}{M}, \quad (3)$$

где q – концентрация абразивных примесей в воздухе или смазке;

R – средний радиус абразивных частиц;

σ – предел прочности;

ρ – радиус кривизны сопрягаемых поверхностей;

v_1, v_2 – скорости скольжения контактирующих поверхностей;

M – физико-механические свойства материала.

Исходя из анализа формул (2) – (4) можно утверждать, что существенное влияние на интенсивность износа оказывают размеры абразивных частиц. Исследования наличия абразивных частиц в отработанном масле [5, 9] в лабораторных условиях, показали, что основная масса частиц (до 80 %) имеет размер до 20 мкм, но можно встретить отдельные частицы размером более 100 мкм (кварц, различные конгломераты и т. д.). Среднее значение размеров загрязняющих частиц в масле представлено на рисунке 3.

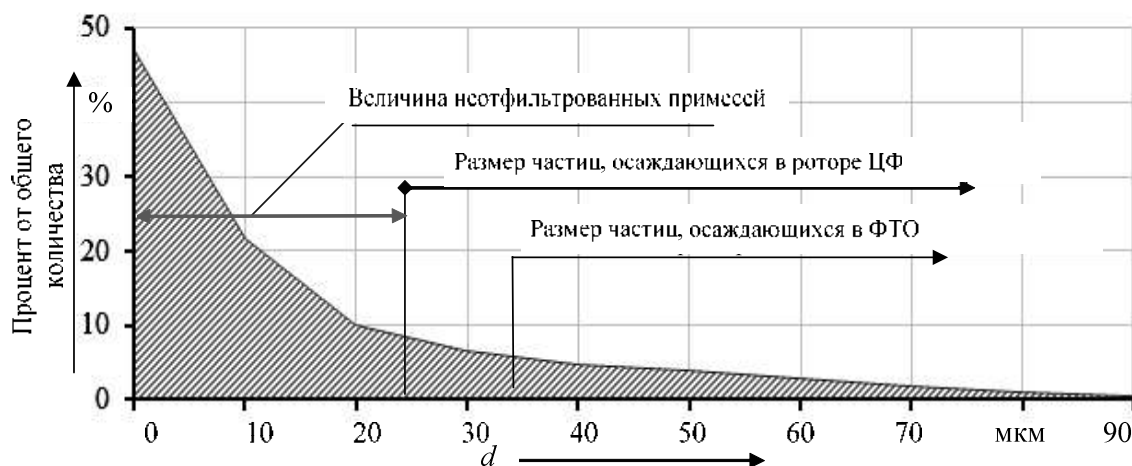


Рисунок 3 – Распределение загрязняющих частиц в масле

Практически на всех дизельных локомотивах применяются три типа фильтров непрерывного действия по очистке моторного масла [5, 6]:

фильтр грубой очистки (ФГО), представляющий собой пластинчато-щелевой фильтр с различным количеством секций (размер улавливающих частиц – от 100 до 150 мкм);

фильтр тонкой очистки (ФТО), его элементы изготовлены из бумаги либо войлока. Величина отсева ФТО составляет 30 – 35 мкм;

центробежный фильтр (ЦФ), где осаждение загрязняющих частиц происходит под действием поля центробежных сил, которые оседают на внутренней поверхности ротора. Величина отсева ЦФ составляет в среднем 25 мкм.

Согласно проведенному анализу бортовые средства очистки способны задержать только до 20 % загрязняющих примесей в масле [5, 7], поэтому необходимо применять дополнительные средства для очистки моторного масла.

Для повышения качества очистки и осветления моторного масла тепловоза от загрязняющих примесей (в том числе и от продуктов износа) предлагается использование внешнего стационарного устройства очистки в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4, где для очистки масла используется промышленная центрифуга. Технические параметры центрифуги позволяют достигать частоты вращения $8000 - 10000 \text{ мин}^{-1}$, производительности – 60 л/мин, вязкости очищаемого масла – $350 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Стационарное устройство очистки масла от загрязняющих примесей (рисунок 4) предлагается использовать на плановых видах технического обслуживания локомотивов ТО-3. Это позволит осуществлять тонкую очистку моторного масла без дополнительного вывода локомотива из эксплуатации. Очистка моторного масла заключается в его циркуляции при помощи шестеренчатого насоса 3 через маслоподогреватель 5 и центрифугу 9, где приводом служит электродвигатель 8, после чего масло сливается обратно в картер дизеля.

У большинства локомотивов плановая смена моторного масла согласно инструкции по эксплуатации осуществляется на очередном текущем ремонте или техническом обслуживании ТО-3 через пробег не более 120 тыс. км. До достижения 120 тыс. км локомотив совершит до шести плановых технических обслуживаний ТО-3. Время на проведение ТО-3 согласно системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» для магистраль-

ных локомотивов составляет 12 ч, т. е. в течение данного времени возможно подключение стационарного устройства очистки к тепловозу.

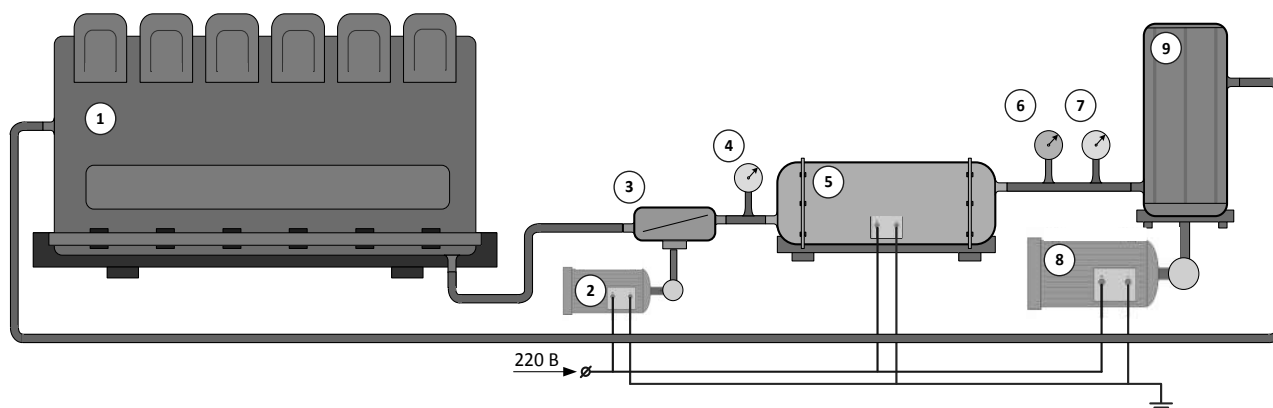


Рисунок 4 – Схема подключения промышленной центрифуги к дизелю:

1 – дизель; 2, 8 – электродвигатели; 3 – масляный насос; 4 – датчик давления; 5 – маслоподогреватель; 6 – датчик температуры; 7 – датчик давления; 9 – центрифуга

Для очистки моторного масла от мелкодисперсных загрязняющих примесей центрифуга должна отвечать требуемым техническим характеристикам. Эффективность работы устройства центробежной очистки масла складывается из показателей полноты отсева с учетом оптимальных параметров частоты оборотов ротора, и числа осветления масла.

Полнота отсева (коэффициент отсева) представляет собой отношение площади сечения зоны потока к площади полного потока с учетом коэффициента разделяемости смеси [8, 10]:

$$\varphi = \frac{d^2 \omega^2 \Delta \pi h_p (R_p - r_p)^2}{36 \mu Q_p}, \quad (4)$$

где Q_p – объемный расход масла, $\text{м}^3/\text{с}$;

Δ – разность плотностей загрязняющих частиц и масла, $\Delta = \rho_1 - \rho_2$;

h_p – высота ротора, м.

R_p – радиус внутренней поверхности ротора, м;

r_p – внутренний радиус слоя жидкости в роторе, м;

ω – угловая скорость, с^{-1} ;

d – диаметр частиц загрязнений, мкм;

μ – динамическая вязкость масла, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

При определении оптимального числа оборотов ЦФ для качественной очистки масла от загрязняющих примесей необходимо учитывать динамическую вязкость масла и отношение радиусов поверхности ротора и слоя жидкости [8, 9], мин^{-1} :

$$n = 40,5 \sqrt{\frac{\mu}{\Delta d^2 \tau} \cdot \ln \frac{R_p}{r_p}}, \quad (5)$$

где τ – среднее время осаждения частиц на стенки ротора, $\tau = (R_p - r_p) / v_{\text{ср}}$, с;

$v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения частиц в роторе.

Эффективную работоспособность центрифуги можно оценить числом осветления, которые характеризует способность центрифуги полностью очищать (осветлять) жидкость за определенный период времени [5], $\text{см}/\text{с}$;

$$B = \frac{2Q_p g}{\pi \cdot h_p \cdot (R_c^2 - r_c^2) \cdot \omega^2} \cdot \frac{R_c - r_c}{R_c + r_c}, \quad (6)$$

где Q_p – производительность центрифуги, м³/ч;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

В соответствии с формулами (4) – (6) получена зависимость отношения числа оборотов центрифуги к диаметру частиц в масле (см. рисунок 4).

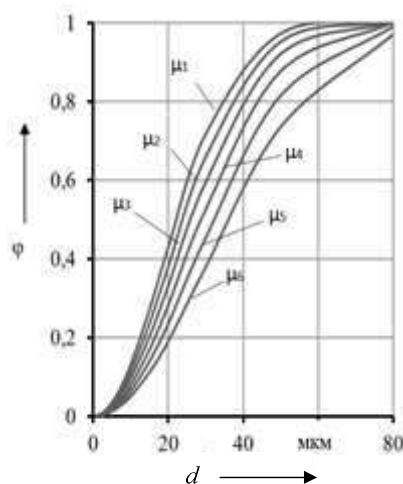


Рисунок 5 – Изменение коэффициента отсева в зависимости от диаметра частиц:

μ_1 – 9 Па·с; μ_2 – 10 Па·с;
 μ_3 – 11 Па·с; μ_4 – 12 Па·с;
 μ_5 – 13 Па·с; μ_6 – 14 Па·с

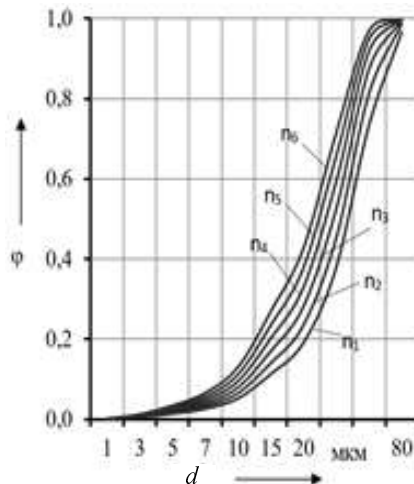


Рисунок 6 – Изменение коэффициента отсева в зависимости от частоты оборотов ЦФ:

n_1 – 4000 мин⁻¹; n_2 – 4500 мин⁻¹;
 n_3 – 5000 мин⁻¹; n_4 – 5500 мин⁻¹;
 n_5 – 6000 мин⁻¹; n_6 – 6500 мин⁻¹

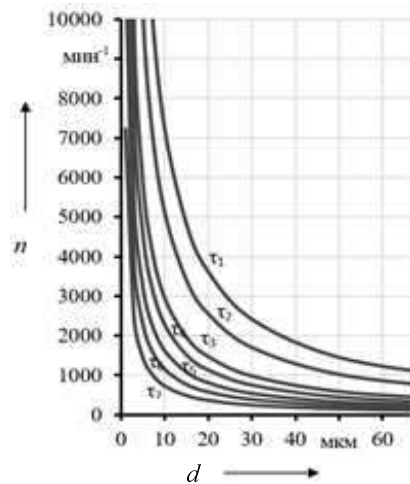


Рисунок 7 – Отношение числа оборотов центрифуги к диаметру частиц в масле:

τ_1 – 50 с; τ_2 – 20 с; τ_3 – 10 с;
 τ_4 – 5 с; τ_5 – 3 с; τ_6 – 1 с; τ_7 – 0,5 с

Описанная методика расчета, позволяет определить оптимальные параметры работы центрифуги, необходимые для условий по очистки моторного масла от загрязняющих примесей. Предложенный метод использования СУО позволит повысить эффективность очистки и осветления масла без вывода локомотива на неплановый простой. Это будет способствовать увеличению ресурса деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма и увеличению срока старения моторного масла, что приводит к экономии затрат на ремонт, снижению количества смен моторного масла по браковочным показателям и простоя локомотивов.

Список литературы

1. Киселев, В. И. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов [Текст]: Учебник / В. И. Киселев / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 558 с.
2. Овчаренко, С. М. Моделирование процесса накопления продуктов износа в моторном масле тепловозного дизеля Д49 [Текст] / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3(19). – С. 31 – 36.
3. Овчаренко, С. М. Повышение эффективности системы диагностирования тепловозов [Текст]: Дис... докт. техн. наук: 05.22.07 / Овчаренко Сергей Михайлович. – Омск, 2007. – 368 с.
4. Беркович, И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник [Текст] / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2000. – 268 с.
5. Григорьев, М. А. Очистка масел и топлива в автотракторных двигателях [Текст] / М. А. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1970. – 271 с.

6. Крагельский, И. В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник [Текст] / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
7. Стребков, С. В. Применение топлива, смазочных материалов и технических жидкостей в агропромышленном комплексе: Учебное пособие [Текст] / С. В. Стребков, В. В. Стрельцов / Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина. – Белгород, 1999. – 404 с.
8. Морозов, Г. А. Очистка масла в дизелях [Текст] / Г. А. Морозов, О. М. Арциомов. – Л.: Машиностроение. 1971. – 192 с.
9. Овчаренко, С. М. Расчет параметров работы центробежного фильтра масляной системы дизеля [Текст] / С. М. Овчаренко, И. Н. Денисов, В. А. Минаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – № 2(22). – С. 33 – 39.
10. Качанова, Л. С. Динамика очистки отработанного масла скоростными центрифугами [Текст] / Л. С. Качанова, Л. А. Нагорский // Совершенствование процессов и технических средств в АПК: Сб. науч. тр. / Азово-Черномоская инженерная академия. – Зерноград, 2003. – Вып. 5. – С. 52 – 56.

References

1. Kiselev V. I. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov (Maintenance and repair of locomotives)*. Moscow: ZHDT UMTS, 2007, 558 p.
2. Ovcharenko S. M., Minakov V. A. Simulation of the process of accumulation of wear in the engine diesel oil D49 [Modelirovanie processa nakopleniya produktov iznosa v motornom masle teplovoznogo dizelya D49]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2014, no 3 (19), pp. 31 – 36.
3. Ovcharenko S. M. *Povyshenie ehffektivnosti sistemy diagnostirovaniya teplovozov (Improved locomotive diagnosing system)*/ Doctor`s. thesis tehn. Omsk, Sciences, 2007, 368 p.
4. Berkovich I. I., Gromakovsky D. G. *Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mekhanika i tekhnicheskije prilozheniya (Tribology. Physical foundations, mechanics and technical applications)*. Samara, 2000, 268 p.
5. Grigoriev M. A. *Ochistka masel i topliva v avtotraktornyh dvigatelyah (Purification of oils and fuels in automotive engines)* Moscow: Mechanical Engineering, 1970, 271 p.
6. Kragelsky I. V. *Trenie, iznashivanie i smazka (Friction, wear and lubrication)*. Moscow: Mechanical Engineering, 1978, 400 p.
7. Strebkov S. V., Streltsov V. V. *Primenenie topliva, smazochnykh materialov i tekhnicheskikh zhidkostej v agropromyshlennom komplekse (The use of fuels, lubricants and industrial liquids in arropromyshlennom complex)*. Belgorod: Belgorod State Agricultural Academy, 1999. 404 p.
8. Morozov G. A., Artyomov O. M. *Ochistka masla v dizelyah (Clean oil in diesel engines)*. L.: Mechanical Engineering, 1971, 192 p.
9. Ovcharenko S. M., Denisov I. N., Minakov V. A. Calculation of parameters of operation of a centrifugal oil filter system diesel [Raschet parametrov raboty centrobezhnogo fil'tra maslyanoj sistemy dizelya. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2015, no 2 (22). pp. 33 – 39.
10. Kachanova L. S. Dynamics of cleaning used oil-speed centrifuges [Dinamika ochistki otrabotannogo masla skorostnymi centrifugami]. *Improvement of processes and equipment in agriculture. Collection of scientific papers*. no. 5., 2003, 52 – 56 pp.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Minakov Vitaliy Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Старший преподаватель кафедры «Локомотивы»,
ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Сорокина Марина Александровна
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.
Студентка кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Sorokina Marina Aleksandrovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Student of the department «Locomotives», OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Минаков, В. А. Повышение качества очистки моторного масла дизелей локомотивов [Текст] / В. А. Минаков, М. А. Сорокина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 55 – 62.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Minakov V. A., Sorokina M. A. Improving the quality of purification locomotive engine oil. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 55 – 62 (In Russian).

УДК 625.1:656.2

В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье рассмотрены особенности и выделены преимущества использования динамических режимов для диагностирования узлов подвижного состава. Приведены конкретные примеры диагностирования отдельных агрегатов локомотива по вибрации, температуре, электрическим параметрам, частоте вращения. Обоснована актуальность задачи по разработке систем диагностирования с использованием эталонных моделей.

Ключевые слова: вибрация, температура, диагностирование, спектральный анализ, локомотив, переходный режим, эталонная модель.

Vladimir Yu. Tetter, Aleksandr Yu. Tetter

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THE USE OF TRANSIENT REGIMES IN DIAGNOSING THE CRITICAL PARTS OF THE ROLLING STOCK

Abstract. In the article the peculiarities and the advantages of using dynamic modes for diagnosing units of rolling stock. Specific examples of the diagnostics of separate units of the locomotive vibration, temperature, electrical parameters, frequency of rotation. The urgency of the task of developing diagnostic systems using the reference models.

Keywords: vibration, temperature, diagnostics, spectral analysis, locomotive, transitional mode, the reference model.

Диагностирование является необходимым элементом технологии обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог. В большей мере это относится к тяговому подвижному составу – локомотивам. Диагностирование (в соответствии с ГОСТ 27518-87 [1]) позволяет решать задачи по поддержанию установленного уровня надежности, обеспечению требований безопасности и эффективности эксплуатации локомотивов.

Наиболее эффективным является комплексное сквозное диагностирование ответственных узлов и агрегатов. Сквозное диагностирование подразумевает контроль технического состояния объекта на различных стадиях технического обслуживания и ремонта, например, диагностирование подшипников тягового электродвигателя (ТЭД) на испытательной станции, в составе собранного колесно-моторного блока (КМБ), диагностирование под локомотивом.

К наиболее ответственным (лимитирующим) узлам локомотивов относят роторные механические узлы: буксовые подшипники, моторно-якорные подшипники тяговых электродвигателей, зубчатые зацепления редукторов. Для тепловозов это дизель-генераторная установка (ДГУ). В вагонном хозяйстве диагностируются элементы редукторов от средней части оси и буксовые подшипники колесных пар.

Практически все диагностическое оборудование используется для определения технического состояния объекта в стационарных режимах его работы. Так, при вибродиагностировании колесно-моторных блоков локомотивов и колесных пар вагонов они приводятся во вращение и выводятся на стационарный режим с использованием специальных устройств поддержания стабильной частоты вращения – это является одним из необходимых условий успешного диагностирования.

С точки зрения авторов, в вопросах диагностирования подвижного состава незаслуженно недооцененными оказались динамические (переходные) режимы работы. Из теории автоматического регулирования известно, что наибольшее количество информации (по некоторым оценкам до 90 %) о свойствах объекта можно получить именно при анализе информации, полученной в переходных режимах. Анализ открытых источников по этой тематике показал, что публикаций по этой теме ограниченное количество. Практическое использование динамических режимов для диагностирования подвижного состава носит единичный характер. Эту ситуацию можно объяснить несколькими причинами:

организация динамического режима, как правило, требует дополнительного оборудования (дополнительных усилий) для задания возмущающих воздействий;

обработка и анализ полученной информации требуют разработки более сложных алгоритмов и математического аппарата, а также выработки критериев по отнесению диагностируемых объектов к той или иной градации технического состояния.

Диагностирование по вибрации. Одними из немногих разработчиков вибродиагностического оборудования (ВДО), которые реализовали в своих программно-аппаратных комплексах инструмент для исследования переходных режимов, является фирма «ИНКОТЕС». Но это универсальные инструменты для фиксации различных зависимостей в переходных режимах. Критерии оценки технического состояния объекта, диагностические признаки и тем более пороговые значения анализируемых параметров не приводятся.

К упомянутым инструментам относят следующие [2]:

– диаграмму Боде (рисунок 1), которая представляет собой зависимость уровня вибрации от частоты вращения;

– диаграмму Найквиста (уровень вибрации в зависимости от фазового угла) (рисунок 2);

– график зависимости уровня вибрации от времени;

– график зависимости частоты вращения от времени.

Более широкие возможности исследования переходных процессов вибрации предоставляет ручной программно-аппаратный комплекс CSI 2140 фирмы CSI США (рисунок 3).

Программное обеспечение этого оборудования позволяет не только регистрировать временные характеристики типа «разгон – выбег», но и фиксировать реакцию системы на дельта-импульс.

Интересные решения по использованию динамических режимов для определения технического состояния отдельных подшипников предлагают специалисты Санкт-Петербургской фирмы «ВАСТ» совместно с соавторами из фирмы «НПП Диавэл» (Хабаровск).



Рисунок 1 – Диаграмма Бодэ



Рисунок 2 – Диаграмма Найквиста



Рисунок 3 – Виброанализатор CSI 2140

Эти решения предполагают использование натуральных эталонных моделей и закреплены патентом России [3]. Авторами предложены оригинальные способы диагностирования роторных механизмов по изменениям вибрации в переходных режимах.

Суть первого способа состоит в том, что в переходных режимах фиксируют и сравнивают с пороговыми значениями амплитудные составляющие на характерных для отдельных дефектов частотах. При раскрутке механизма или его остановке фактически происходит частотное сканирование возмущающим фактором. При этом частотные составляющие текущих спектров, являющиеся диагностическими признаками дефектов, входят в резонанс с текущей частотой вращения или ее гармониками. В момент резонанса происходит резкое увеличение амплитуды характерной частоты, что позволяет выделить ее из шумовых компонентов. После ее обнаружения процесс диагностирования можно прекратить, не дожидаясь диагностирования в установившемся режиме. Такое решение позволит значительно сократить общее время диагностирования, например, локомотива, на две секции которого приходится от 32 контрольных точек и более.

Еще один способ заключается в том, что записанный в переходном режиме массив данных с вибродатчика транспонируют в другой массив, в котором интервал по времени обратно пропорционален текущему значению частоты вращения. В этом случае происходит искусственное приведение частоты вращения к единому значению. Транспонированный массив раскладывают в ряд Фурье, который анализируют на наличие диагностических признаков по известным алгоритмам для установившихся режимов.

Диагностирование по температуре. Диагностической информацией, которая в настоящее время практически не используется для определения технического состояния подвижного состава, является температура. Это обусловлено тем, что данный параметр в большинстве случаев не «вписывается» в технологию ремонта из-за относительно большого времени (десятки минут), которое требуется для постановки диагноза. При диагностировании колесно-моторных блоков локомотивов оперативность получения диагноза является одним из определяющих факторов. Анализ изменения температуры может быть использован, например, при испытаниях и обкатке локомотивных редукторов после их ремонта или при испытаниях вагонных редукторов от средней части оси. Так, например, в ряде пассажирских вагонных депо для определения технического состояния редукторов типа ВБА и ЕЮК (при участии первого автора) была внедрена оригинальная система прогнозирования установившегося значения температуры при постоянном возмущающем воздействии, например, при вращении механизма с постоянной частотой вращения на холостом ходу или с постоянной нагрузкой. Система основана на наблюдении за изменением производной температуры, при этом использовались эталонные динамические температурные модели редукторов. Эталонные модели были сформированы путем обработки экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях. Такая система позволяет в четыре – пять раз сократить время испытания в случае неработоспособного редуктора и не только уменьшить трудоемкость процесса, но и сэкономить электроэнергию. Инициативные работы по использованию тепловизоров для отслеживания динамики температурных полей буксовых узлов колесных пар уже несколько лет ведутся в ООО «ВКМ» (Старый Оскол).

Диагностирование электрических машин. В настоящее время для определения состояния подсистемы электрической части локомотива используются комплексы, например, типа «Доктор», измеряющие статические параметры: переходные и пусковые сопротивления, сопротивления изоляции, индуктивность, емкость.

Для электрических двигателей функциональное диагностирование, как правило, основано на спектральном анализе вибраций, фазных токов и напряжений, измеряемых в стационарных режимах работы двигателя [4]. Электродвигатели локомотивов значительное время эксплуатируются в переходных режимах. Для таких режимов характерны токи, которые мо-

гут в несколько раз превышать значения токов в стационарных режимах. Вследствие этого неисправности, которые возникают в «динамике», не могут быть обнаружены при испытаниях в «статике» [4]. Работы, посвященные исследованию динамических режимов электрических машин подвижного состава с целью их диагностирования, авторам не известны.

Таким образом, можно предположить, что развитие направления диагностирования электрических машин в «динамике» позволит выявлять ранее не обнаруживаемые неисправности или определять неисправности в стадии их зарождения.

Диагностирование дизеля в переходных режимах. Так же, как и электродвигатели электровозов, дизель-генераторная установка значительную часть времени работает в переходных режимах. Для маневровых тепловозов это время составляет 50 % [5]. Диагностирование и настройка тепловозных дизелей регламентированы и осуществляются на станциях реостатных испытаний путем определения значений отдельных параметров ДГУ в статических режимах.

В условиях эксплуатации при переключении контроллера длительность переходных процессов в ДГУ варьируется в пределах от 15 – 25 с до 6 – 8 мин [5]. В этой же работе отмечается целесообразность диагностирования ДГУ в переходных режимах, но констатируется также, что «диагностика дизеля в неустановившемся режиме при текущей эксплуатации представляется достаточно сложной».

Анализ доступных источников информации показал, что работы по исследованию динамических режимов ДГУ с целью ее диагностирования не нашли широкого применения на сети железных дорог. Изучение работ по данному направлению в других отраслях, например, в сельском хозяйстве, также показывает, что исследования заканчиваются на уровне экспериментальных моделей.

Авторы исследовательских работ в этом направлении считают, что с помощью анализа динамических режимов работы можно как производить интегральную оценку работы и настройки ДГУ, так и идентифицировать неисправности в отдельных узлах и агрегатах.

Экспериментальные работы, проведенные авторами на ДГУ тепловозов 2ТЭ10, ТЭМ2, ТГМ4 при реостатных испытаниях, показали принципиальную возможность реализации систем диагностирования на основе анализа различных динамических процессов. Так, например, с помощью определения мгновенных составляющих углового ускорения коленчатого вала (при переходе с позиции на позицию) оценивался вклад каждого цилиндра в общую развиваемую мощность. Получаемая таким образом информация в совокупности с анализом вибросигналов с топливных трубок высокого давления и форсунок позволяет локализовать местонахождение неисправности (либо это цилиндропоршневая группа, либо топливная система) и идентифицировать ее.

Эксперименты по исследованию переходных процессов в газоздушном тракте (ГВТ) тепловоза 2ТЭ10 позволили создать его математическую модель по параметру расхода воздуха в виде динамического звена второго порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1},$$

где p – оператор Лапласа;

T – постоянная времени;

k – передаточный коэффициент;

ξ – коэффициент затухания.

Переходные процессы были получены путем организации ступенчатого воздействия по расходу воздуха в газоздушном тракте. Производилось мгновенное перекрытие доступа воздуха в систему и отслеживалось изменение параметра давления в различных сечениях ГВТ. Затем полученные кривые переходных процессов обрабатывались с помощью программной среды «СИМТЕХ». В результате обработки производилась идентификация коэф-

фициентов передаточной функции колебательного звена второго порядка по временным характеристикам.

Использование модели, полученной на основе эмпирических данных, позволяет уточнять или корректировать математические модели, создаваемые с целью оценки технического состояния газовоздушного тракта тепловозных дизелей [6].

Авторы считают целесообразным использование систем диагностирования в переходных режимах, которые основаны на эталонных моделях. Такой подход не только позволит обнаруживать недопустимые режимы работы и идентифицировать неисправности, но и поможет в реализации систем автоматической настройки. Подобный подход был отработан в модельных экспериментах по настройке топливных регуляторов авиационных двигателей [7, 8] и получил дальнейшее развитие [9].

Таким образом, использование динамических режимов при диагностировании узлов подвижного состава позволит снизить затраты на его техническое обслуживание и ремонт, повысить уровень работоспособности отдельных агрегатов, а для локомотивов повысить коэффициент их готовности.

Рассмотренное направление следует считать перспективным, особенно с учетом уровня развития цифровой техники и современных математических методов обработки информации.

Список литературы

1. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.
2. Программа измерения и анализа вибрации на переходных режимах (анализ характеристик «Старт/Стоп») фирмы «ИНКОТЕС», 18.09.2017. Режим доступа: <http://www.Vib-ra-ti-on.ru/start-stop/start-stop.shtml>
3. Пат. № 2336512 Российская Федерация, МПК G01M13/04. Способ комплексной вибродиагностики подшипников качения и устройство для его осуществления [Текст] / Рябцун А. А., Барков А. В., Рябцун С. А.; заявители и правообладатели Рябцун А. А., Барков А. В. – 2006143733/28; заявл. 08.12.2006; опубл. 20.10.2008. Бюл. № 29.
4. Чернов, Д. В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.11.01 / Чернов Дмитрий Владимирович. – Ульяновск, 2005. – 129 с.
5. Наговицын, В. С. Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий [Текст] / В. С. Наговицын / ВИНТИ РАН. – М., 2004. – 246 с.
6. Титанакон, Д. А. Оценка технического состояния газовоздушного тракта тепловозных дизелей [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Титанакон Денис Александрович. – Омск, 2005. – 173 с.
7. А. с. 1515889 СССР, МГЖ G 01M 15/00. Способ испытания топливного регулятора газотурбинного двигателя и устройство для его осуществления [Текст] / Тэттер В. Ю., Шендалева Е. В. (СССР). 4264555/25-06; Заявл. 16.06.87; Опубл. 15.06.89.
8. А. с. 1605749 СССР, МПК G 01M 15/00. Стенд для испытания топливного регулятора системы автоматического управления газотурбинного двигателя [Текст] / Тэттер В. Ю., Шендалева Е. В. (СССР). 4687781/25-06; Заявл. 05.05.89; Опубл. 05.06.90.
9. Шендалева, Е. В. Разработка и исследование многоцелевого моделирующего стенда для систем автоматического управления малоразмерных газотурбинных двигателей [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.07.07 / Шендалева Елена Владимировна. – Омск, 2002. – 249 с.

References

1. *Diagnostirovanie izdeliy. Obshie trebovaniya, GOST 25518-87* (Diagnostics of products. General standards State Standard 25518-87). Moscow, Standartinform, 2009, 10 p.
2. *Programma izmerenia i analiza vibratsii na perehodnih rejimakh (analiz haracteristic «START/STOP») fizmi «INKOTES»*, (Program for measuring and analyzing vibration in transient modes), 18.09.2017 <http://www.vibration.ru/start-stop/start-stop.shtml> zavavleno 08.12.2006, opublikovano 20.10.2008.
3. Rabtsun A. A., Barkov A. V., Rabtsun S. A. *Patent RU 2336512 C2*, 20.10.2008.
4. Chernov D.V. *Funktsionalnaya diagnostika asinhronnykh elektrodvigately v perekhodnykh rejimakh raboti* (Functional diagnostics of asynchronous electric motors in transient modes of operation). Ph. D. thesis, Ulyanovsk, 2005. 129 p.
5. Nagovitsin V.S. *Sistemy diagnostiki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava na osnove informatsionnykh tekhnologiy* (Diagnostics systems for railway rolling stock based on information technology), Moscow: VINITI RAN, 2004, 246 p.
6. Titanacov D. A. *Otcenka sostoyaniya gazovozdushnogo trakta diziley* (Estimation of the state of the gas-air tract of diesel engines). Ph. D. thesis, Omsk, 2005. 173 p.
7. Tetter V. Y., Shendaleva E. V., A.S. 1515889 SSSR *МГЖ G01M 15/00*. 15.06.89.
8. Tetter V.Y., Shendaleva. E.V., A.S. 1605749 SSSR, *МПК G01M 15/00*. 05.06.90.
9. Shendaleva E.V. *Razrabotka i issledovaniye mnogotselevogo modeliruyushchego stenda dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya malorazmernykh gazoturbinnnykh dvigateley* (Research and development of a multi-purpose modulating stand for automatic control systems for small-sized gas turbine engines). Ph. D. thesis, Omsk, 2002. 249 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тэттер Владимир Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8(3812)31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

Тэттер Александр Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8(3812)31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тэттер, В. Ю. Использование переходных режимов при диагностировании ответственных узлов подвижного состава / В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – №1 (33). – С. 62 – 68.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tetter Vladimir Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: 8(3812)31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

Tetter Aleksandr Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: 8(3812)31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tetter V. Yu., Tetter A. Yu. The use of transient regimes in diagnosing the critical parts of the rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 62 – 68 (In Russian).

А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Аннотация. В статье рассматривается анализ способов получения статистически достоверных данных о контактном нажатии, которые базируются на результатах инспекционных поездок и данных о проектных значениях расположения контактных проводов в вертикальной плоскости и в плане пути. Предложен метод расчета контактного нажатия с помощью искусственных нейронных сетей. Рассмотрены способы получения статистически достоверных данных о контактном нажатии токоприемников электроподвижного состава без необходимости прямого измерения, на основе видеоизображения процесса токосъема и анализа внешних факторов (погодных, эксплуатационных), сопровождающих взаимодействие.

Ключевые слова: токоприемник, нейронная сеть, контактное нажатие, среднеквадратичная ошибка, прогнозирование по замкнутому циклу.

Anton S. Golubkov, Gleb R. Ermachkov, Oleg A. Sidorov, Alexander N. Smerdin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS AT SIMULATION OF A SYSTEM OF CURRENT COLLECTION ON ELECTRIC RAILWAYS

Annotation. The article deals with the analysis of methods for obtaining statistically reliable data on contact pressure, which are based on the results of inspection trips and data on the design values of the location of the contact wires in the vertical plane and in the path plan. A method for calculating contact pressing with artificial neural networks is proposed. The methods of obtaining statistically reliable data on the contact pressing of current collectors of electric rolling stock without the need for direct measurement, based on the video image of the current collection process and analysis of external factors (weather, operational) accompanying the interaction are considered.

Keywords: current collector, neural network, contact force, mean-square error, closed-cycle prediction.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1] предусматривает комплексное совершенствование инфраструктуры железных дорог и электроподвижного состава (ЭПС). Намеченные ориентиры модернизации вызывают неизбежное увеличение механических и электрических нагрузок на контактную сеть и токоприемники ЭПС, от надежности работы которых напрямую зависят затраты на содержание, ремонт и безопасность функционирования всей сети железных дорог.

В настоящее время актуальными для мирового железнодорожного транспорта являются проблемы, связанные с взаимодействием токоприемников ЭПС и подвесок контактной сети (ПКС).

Для обеспечения надежной и безаварийной работы токосъемных устройств необходимо на этапе проектирования и реализации инфраструктуры системы токосъема определить наилучшее сочетание конструктивных параметров и характеристик ПКС для взаимодействия с токоприемниками, предназначенными для высокоскоростного движения на всех эксплуатационных режимах.

Неотъемлемой частью такого подхода является проведение имитационных экспериментов и исследовательских поездок по действующим электрифицированным железнодорожным участкам с использованием специальных технических средств и программного обеспечения для определения значений основных параметров токосъема, таких как экономичность, экологичность, надежность и оценка прогнозирования срока службы контактных проводов и вставок полозов токоприемников ЭПС.

Концепция развития инфраструктуры ОАО «РЖД» предусматривает техническое единообразие контактной сети на всех полигонах, предназначенных для скоростного движения. Отличия проектных решений, обусловленные особенностями сочетаний эксплуатационных факторов, не носят принципиального характера [2]. Это дает возможность распространить закономерности, выявленные на одном из полигонов скоростного движения, на все подобные участки.

В ходе моделирования (математического и натурного) появляется возможность выбора наилучших сочетаний высотного положения, жесткости ПКС и расположения проводов в плане пути. Проведение вычислительных экспериментов сопряжено со значительной трудоемкостью и длительностью расчетов, однако эти затраты не сравнимы со сложностью и стоимостью выполнения натуральных экспериментов с подобным набором факторов, влияние которых требуется оценить.

Известны следующие модели для исследования динамического взаимодействия ПКС с токоприемниками: модель А. В. Ефимова, А. Г. Галкина и В. В. Веселова (УрГУПС); модель А. С. Голубкова (ОмГУПС) [3]; модель Е. В. Кудряшова (ПГУПС) [4], модель Zhigang Liu (School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, China) [5].

Указанные математические модели характерны тем, что элементы в них представлены в виде материальных точек, а выполнение статических и динамических расчетов связано с соответствующим их числу объемом вычислений дифференциальных уравнений. В этих моделях частично или полностью не учитываются особенности движения подвижного состава или они представлены как сумма колебаний различных частот. Недостоверно представлен токоприемник, отсутствует привязка к местности. Кроме того, расчеты затрудняет неполнота информации о процессе взаимодействия токоприемника и контактной сети, между показателями токосъема имеются нелинейные динамические зависимости.

Разрабатываемая модель должна демонстрировать изменение контактного нажатия ($P_{кт}$) токоприемника в ответ на изменение влияющих факторов, позволяя определить наилучший вариант регулировок ПКС. Это позволит проводить виртуальную «регулировку» контактной сети до ее физического изготовления, а также прогнозировать изменение статистических параметров токосъема при увеличении скоростей движения (свыше 400 км/ч). По результатам расчета можно дать прогноз, при какой скорости движения начнутся нарушения токосъема.

Определение перечня факторов, имеющих влияние на величину контактного нажатия и пригодных для регистрации с помощью видеокамер.

Основным этапом перед формированием модели является подготовка и обработка ранее полученных экспериментальных данных. В нее входят выбор и оценка пригодности (значимости) массива данных для формирования исходного набора.

В ОмГУПСе разработаны методы исследований магистральных токоприемников в лабораторных и эксплуатационных условиях [6 – 8], которые позволяют получать данные о технических характеристиках и определять ряд дополнительных показателей, используя средства видеонаблюдения. Видеорегистраторы фиксируют параметры взаимодействия токоприемника и ПКС. После завершения сеанса видеозаписи проводится обработка информации.

Экспериментально установлено, что спецчасти (секционные изоляторы, воздушные стрелки и др.) ПКС приводят к появлению искажений установившихся значений $P_{кт}$ за счет ударов и отскоков полоза от контактных проводов. Анализ исследований, проведенных в 2012 г. на Октябрьской железной дороге, позволяет сделать вывод о том, что колебания высотного положения контактного провода имеют циклический характер (рисунок 1). В работе [9] показано, что отжатие ПКС, измеренное в ходе экспериментальных поездок при скорости 5 км/ч, коррелирует с высотным положением контактных проводов в нормальном положении ($h_n(l)$) и при отжатии их токоприемником ($h_p(l)$). Можно отметить, что эластичность достаточно равномерна на анкерном участке (коэффициент неравномерности эластичности не более 1,2) и оказывает незначительное влияние на отжатия.

Увеличение скорости ЭПС приводит к увеличению колебаний основания токоприемника, которые передаются в точку контакта, а также к увеличению аэродинамической составляющей $P_{\text{кт}}$. Данный факт делает скорость самым важным фактором, влияющим на $P_{\text{кт}}$.

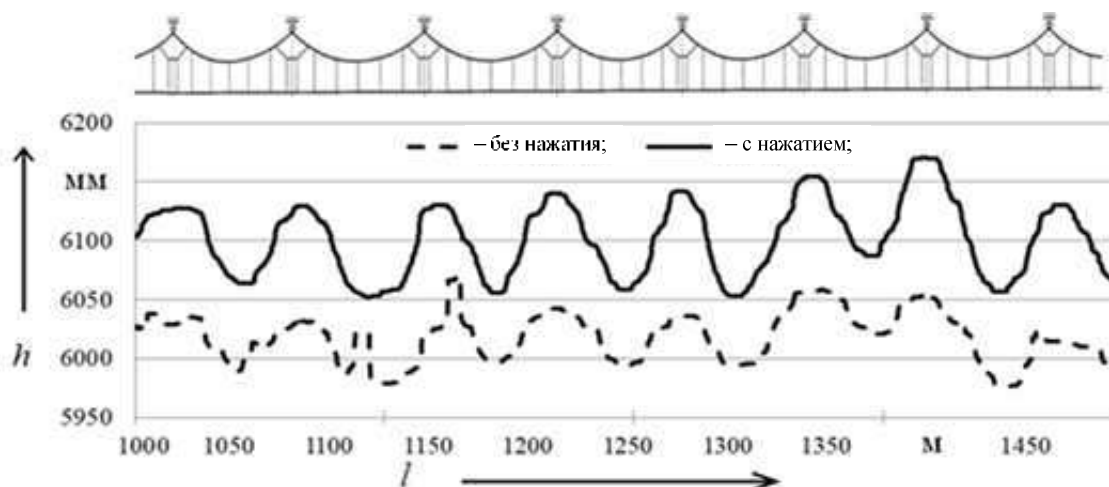


Рисунок 1 – Фрагмент записи высотного положения контактного провода без нажатия $h_n(l)$, с нажатием ($P_{\text{стат}} = 90 \text{ Н}$) $h_p(l)$ при скорости 5 км/ч

На высокоскоростных участках магистральных железных дорог ЭПС движется преимущественно с постоянной скоростью. Разгоны и торможения занимают незначительную часть поездки. В связи с этим актуальными задачами являются определение допустимой скорости движения по условиям токосъема на рассматриваемом участке, расчет показателей его качества, ранжирование участков и конфигураций ПКС по качеству токосъема.

Специалистами ОмГУПСа накоплен массив данных о вертикальной и горизонтальной регулировках ПКС на скоростных участках Октябрьской железной дороги и Северокавказской железной дороги, а также получены экспериментальные данные о $P_{\text{кт}}$ при использовании специального ЭПС (вагон-лаборатории ВИКС, электропоезда ЭВС2 «Сапсан», электровазов ЭП20, ЧС200 и др.).

Таким образом, входной вектор модели составлен из следующих наборов моментальных значений экспериментальных данных, привязанных к путевой координате и времени:

- высотное положение провода, отжатого токоприемником (h_n);
- высотное положение провода с контактным нажатием (h_p);
- зигзаг контактного провода (z);
- скорость ЭПС (U);
- контактное нажатие ($P_{\text{кт}}$).

Проведение анализа моделей прогнозирования.

Для решения задачи прогнозирования $P_{\text{кт}}$ можно использовать подходы с применением различных моделей. Основные результаты сравнения этих подходов приведены в таблице 1.

Результат корреляционного анализа эксплуатационных данных, полученных на скоростном испытательном полигоне Белореченск – Майкоп (2012 г.), сведен в таблицу 2, из данных которой следует, что предикторные переменные имеют слабую корреляционную зависимость с искомой величиной и друг с другом. Можно сделать вывод о том, что зависимость величин имеет сложный нелинейный характер, который корреляция не выявляет.

В случае составления нелинейной зависимости с несколькими предикторными величинами регрессионный анализ становится достаточно трудоемкой задачей.

После выполнения линеаризации и преобразования значений отклика, предикторов и коэффициентов уравнения (перевод нелинейных зависимостей в линейную форму и обратно) определяется вид нелинейной зависимости, который наилучшим образом описывает связь переменных при каждом парном анализе. Данный регрессионный анализ можно выполнить методом Брандона [10].

Таблица 1 – Основные результаты сравнения подходов с применением различных моделей

Модель	Преимущества	Недостатки
Регрессионная линейная модель: $P(t) = a_0 + a_n X_n(t) + \varepsilon_t$ Нелинейная модель: $P(t) = F(X(t), A)$	Простота, прозрачность моделирования	Трудоемкость определения коэффициентов и вида функциональной зависимости; сложность моделирования нелинейных процессов с несколькими предикторными переменными
Авторегрессионная: $P(t) = C + \varphi_n P_n(t - n) + \varepsilon_t$	Единообразие анализа и проектирования	Трудоемкость и ресурсоемкость идентификации моделей, сложность моделирования нелинейной зависимости; низкая адаптивность
Экспоненциального сглаживания	Простота моделирования	Недостаточная гибкость, низкая точность прогноза
Нейросетевая: $P(t) = \sum_{i=1}^m \omega_i X(t-1) + b;$ $X(t) = \varphi(P(t))$	Нелинейность масштабируемость, адаптивность, обучаемость	Отсутствие прозрачности, сложность выбора архитектуры и алгоритма обучения
Цепей Маркова	Простота моделирования	Невозможность моделирования процессов с длинной памятью
Классификационно-регрессионные деревья	Масштабируемость; быстрая и простота процесса обучения	Неоднозначность алгоритма построения дерева; сложность вопроса останова

Таблица 2 – Корреляционная таблица предикторных переменных

Переменные	h_n	$\Delta h(h_n - h_p)$	$ z $	U	$P_{кт}$
h_n	1,00	-0,18	-0,14	0,16	0,16
$\Delta h(h_n - h_p)$	-0,18	1,00	-0,27	0,29	-0,12
$ z $	-0,14	-0,27	1,00	-0,09	-0,29
U	0,16	0,29	-0,09	1,00	0,03
$P_{кт}$	0,16	-0,12	-0,29	0,03	1,00

Для прогнозирования $P_{кт}$ с применением множественной нелинейной регрессионной модели был выбран массив с данными о высотном положении, расположении проводов в плане пути (зигзаг) и отжати контактных проводов на участке длиной 2000 м. Расчеты регрессионного анализа производятся в *MS Excel* с использованием надстройки «*BRANDDEN*». В таблице 3 представлен фрагмент данных для моделирования динамики процесса.

Таблица 3 – Матрица входных и выходных данных

Номер записи		1	2	3	n	8025	8026	8027
Входная матрица X	h_n , мм	6027	6027	6027	...	5982,11	5982,09	5982,06
	Δh , мм	76	76	76	...	76,28	76,79	77,15
	z , мм	198	197,4	196,38	...	183,85	183,29	182,30
	U , м/с	32,5	32,5	32,5	...	31,9	31,9	31,9
	$P_{кт}$, Н	104	103	105	...	114	115	116

На первом шаге анализа получено логарифмическое регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128 \cdot (1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303). \quad (1)$$

На втором шаге анализа получено степенное регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128 \cdot (1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303)(1,0892(z(t))^{(-0,02)}). \quad (2)$$

На третьем шаге анализа получено степенное регрессионное уравнение:

$$P_{кт}(t) = 110,0128(1,1304 \cdot \ln(h_n(t)) - 8,8303)(1,0892(z(t))^{(-0,02)})(1,1972 \cdot (h_p - h_n(t))^{(-0,04)}). \quad (3)$$

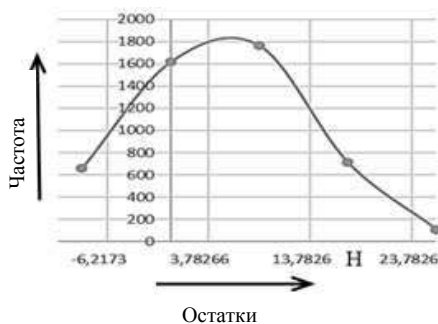


Рисунок 2 – Гистограмма остатков

В результате удалось получить аналитическое выражение, описывающее экспериментальную зависимость $P_{кт}$ от времени. Анализ остатков (разность между наблюдаемыми и предсказываемыми значениями) показал, что критический порог не превышен и гипотеза о нормальности распределения остатков (ошибки прогноза) принимается (рисунок 2). Среднеквадратическая ошибка (MSE) составила 82 Н (рисунок 3) [13].

С помощью данного метода спрогнозировать $P_{кт}$ удалось с невысокой точностью, что не позволяет проводить ранжирование участков и сравнивать различные конфигурации настроек.

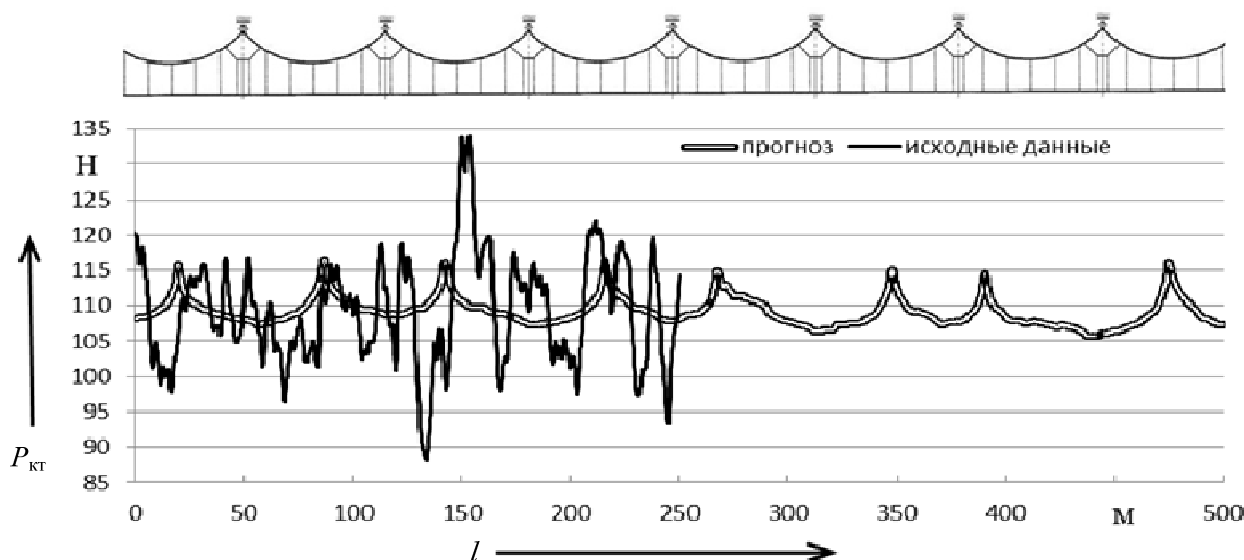


Рисунок 3 – Фрагмент прогноза $P_{кт}$ с применением регрессионной модели

Разработка имитационной модели на основе использования нейронной сети для расчета контактного нажатия.

Для реализации имитационной модели на основе нейронной сети (НС) в *Matlab* была подготовлена выборка, описывающая контактную сеть длиной 2000 м, включающая в себя входную матрицу ($h_n, \Delta h, z, U$) и сведения о $P_{кт}$, полученные экспериментально. Часть этой выборки (1600 м) выделена в тренировочный набор данных, используемый для обучения, остальная часть выборки используется в валидационном наборе данных, предназначенном для прекращения обучения, когда обобщение перестает улучшаться. В качестве тестового набора данных используется участок длиной 5000 м. Для обеспечения независимой оценки сети сведения о $P_{кт}$ на тестовом участке в модель не подавались.

В качестве базовой архитектуры применялась нелинейная авторегрессионная сеть (*Nonlinear Autoregressive Network – NARX*). *NARX* содержит в себе два слоя нейронов. В качестве функции активации в первом (скрытом) слое используется нелинейная сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса (*TANSIG*) [11]. Использование нелинейных функций активации позволяет настроить нейронную сеть на реализацию нелинейных связей между входом и выходом. Функция активации вычисляет выход слоя по его входу.

$$\tan \operatorname{sig}(n) = \frac{2}{(1 + e^{-2n})} - 1, \quad (4)$$

где n – матрица входных векторов.

Количество нейронов в скрытом слое согласно теореме Колмогорова, принято равным 9. На практике количество нейронов может быть уменьшено, чтобы избежать переобучения [12].

Выходной слой сети содержит один нейрон. В качестве функции выполнения в выходном слое и оценки эффективности прогнозирования используется среднеквадратичная ошибка (MSE) [13]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (P(t) - \tilde{P}(t))^2, \quad (5)$$

где N – количество отчетов.

В качестве алгоритма обучения сети на основании проделанной опытной тренировки более высокую эффективность прогнозирования из имеющихся алгоритмов в *MatLAB* обеспечивает функция на основе обратного распространения ошибки с использованием Байесовской регуляризации (*trainbr*) (рисунок 4).



Рисунок 4 – Выбор алгоритма обучения NARX-сети на основе метода квадрата минимальной ошибки

TRAINBR – функция обучения сети, которая модифицирует значения весов и смещений в соответствии с алгоритмом оптимизации Левенберга – Марквардта. При этом минимизируется комбинация квадратов ошибок и весов, затем определяется скорректированная комбинация, которая обеспечивает улучшение обобщающей способности сети. Эта процедура называется байесовской регуляризацией [14].

NARX-сеть является сетью прямого распределения, основанной на линейной модели ARX. В работе используются два вида архитектуры сетей NARX:

- последовательно-параллельная (открытый цикл) (рисунок 5);
- параллельная (замкнутый цикл) (рисунок 6).

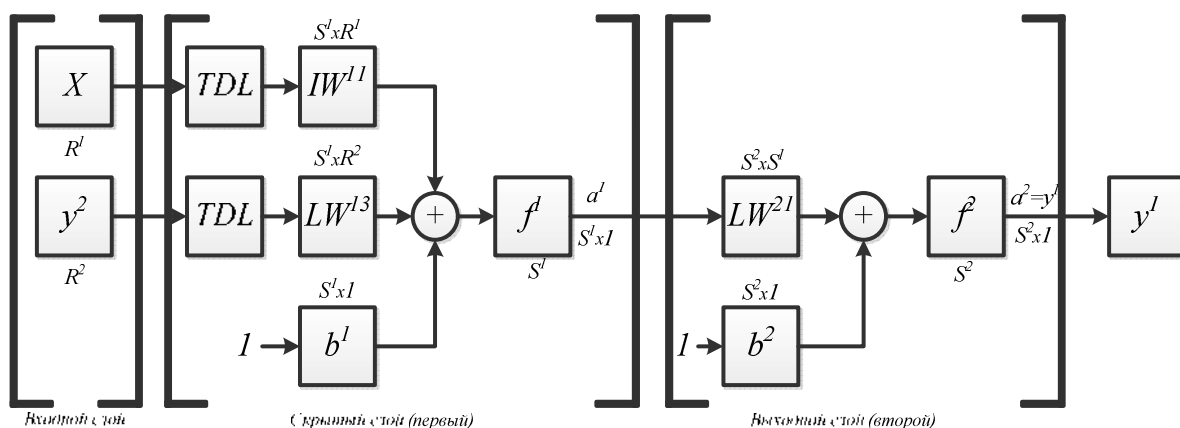


Рисунок 5 – Структурная схема двухслойной нейронной сети (разомкнутый цикл):

X – входной вектор из таблицы 3; TDL – линия задержки;

Y^1 – $P_{\text{кт}}$ расчетное; Y^2 – $P_{\text{кт}}$ экспериментальное

Открытый цикл *NARX* применялся для обучения сети, так как в ней используется истинный вывод вместо того, чтобы возвращать расчетный вывод. Замкнутый цикл хорошо подходит для многоступенчатого прогнозирования, так как в нем присутствует обратная связь (подача расчетного выходного значения обратно на вход). Для преобразования сетей *NARX* из открытого цикла в замкнутый цикл применяется функция *closeloop*.

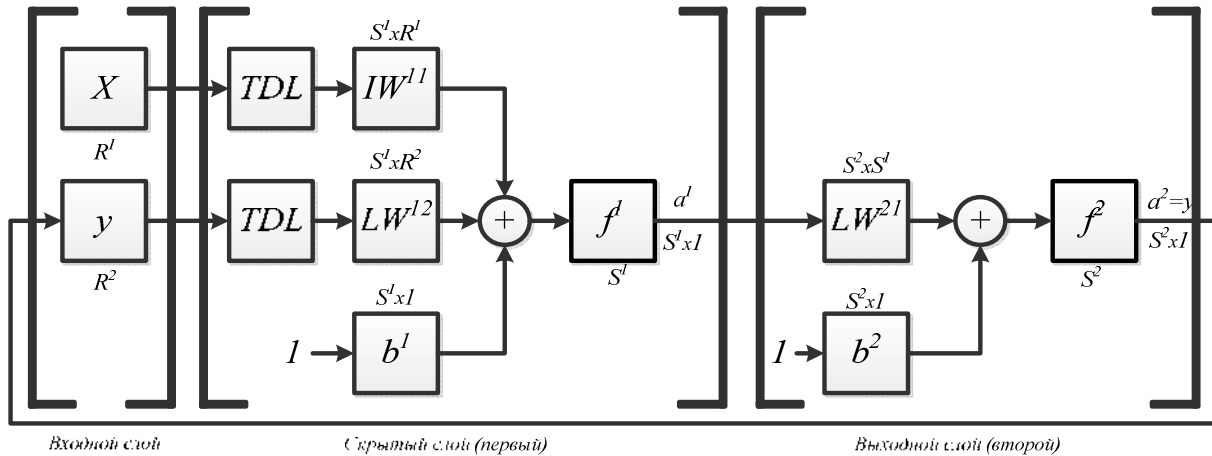


Рисунок 6 – Структурная схема двухслойной нейронной сети (замкнутый цикл)

Векторы выходных данных слоев сети:
разомкнутый цикл:

$$a^1 = f^1(IW^{11}X + LW^{12}Y + b^1); \quad (6)$$

$$a^2 = f^2(LW^{21}a^1 + b^2); \quad (7)$$

замкнутый цикл:

$$a^1 = f^1(IW^{11}X + LW^{12}Y + b^1); \quad (8)$$

$$a^2 = f^2(LW^{21}a^1 + b^2) = Y. \quad (9)$$

Итогом работы НС являются матрица входных весов $IW(9 \times 8)$, матрица весов связей между слоями $LW(9 \times 2)$, матрицы векторов смещений первого $b^1(9 \times 1)$ и второго $b^2(-0.0251)$ слоев). Предложенная имитационная модель на основе использования нейронной сети обучается на основании значений изменения высотного положения, жесткости ПКС, зигзага и скорости ЭПС, а также сведений о контактном нажатии в системе электропоезда ЭП20, оснащенного токоприемником *Faiveley* типа *AX-NG 023*. Модель может быть использована без предварительного обучения для прогнозирования $P_{кт}$ на других участках обращения данного типа ЭПС (рисунок 7). Среднеквадратическая ошибка (*MSE*) составила 56 Н. Среднее значение расчетного $P_{кт}$ отличается от экспериментального на 0,19 Н при скорости 160 км/ч.

С помощью полученной НС было выполнено ранжирование участков скоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва без прямых измерений контактного нажатия, на основании данных о регулировке, полученных с помощью вагона-лаборатории в ходе инспекционных поездок (рисунок 8).

В результате ранжирования выделены участки, требующие регулировки контактной подвески по условиям экономичного токосъема. Движение с высокими скоростями по данным участкам нецелесообразно в связи со значительным ухудшением качества токосъема и высоким износом проводов и контактных вставок.

Предлагаемый метод может быть рекомендован для использования при оценке и прогнозировании работы пары «токоприемник – ПКС» для перспективных скоростных и высокоскоростных линий, в том числе Москва – Казань.

Практическая ценность подготовки обученной нейронной сети заключается в возможности проверки различных конфигураций контактной подвески без ее реального монтажа. Подготовленные данные жесткости и высотных положений, загруженные во входную матрицу НС, позволяют рассчитать $P_{кт}$ для рассматриваемого варианта.

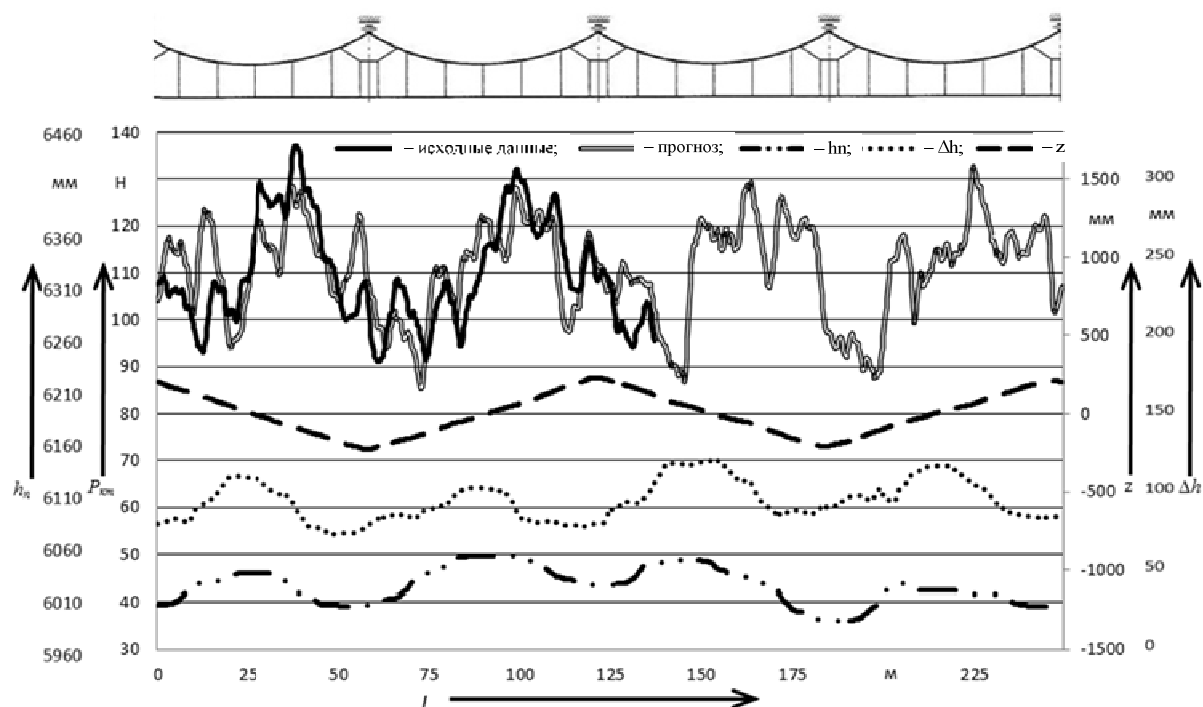


Рисунок 7 – Фрагмент прогноза $P_{кт}$ с применением нейросетевой модели

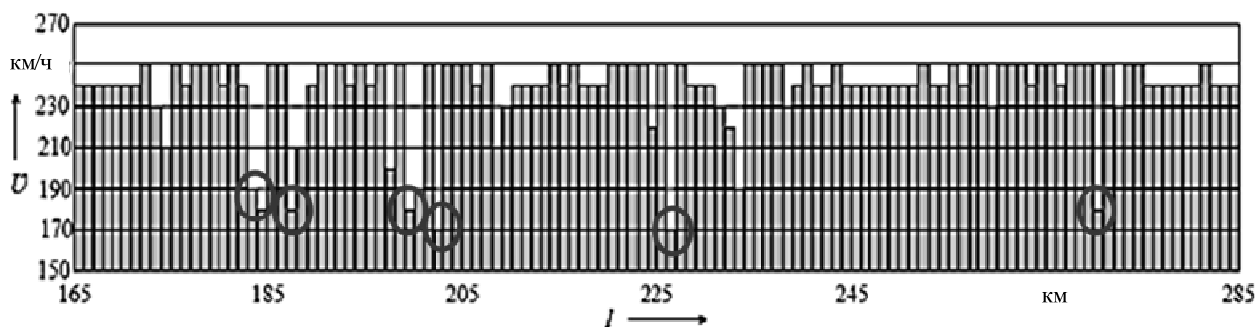


Рисунок 8 – Допустимые скорости движения по условиям экономического токосяема для первого пути фрагмента линии Санкт-Петербург – Москва

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://zakonbase.ru/content/part/581318>
2. Кудряшов, Е. В. Информационное сопровождение жизненного цикла контактной сети на основе конечно-элементной математической модели [Текст] / Е. В. Кудряшов // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2010. – С. 52 – 66.

3. Голубков, А. С. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели [Текст] / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. – 2011. – № 1(1). – С. 30 – 37.

4. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. С. Григорьев, О. А. Головин и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 4 (159). – С. 155 – 162.

5. Zhigang Liu, Song Y, Han Y. et al. Advances of research on high-speed railway catenary. *J. Mod. Transport*, 2018. – no. 26(1). Pp. 1 – 23.

6. Сидоров, О. А. Методика оценки функциональной готовности системы токосъема скоростных участков магистральных железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Вестник ВНИИЖТа / Научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. – М. 2012. – № 1. – С. 27 – 32.

7. Применение цифровых средств измерения для определения динамических характеристик устройств токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Павлов и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2007. – № 4. – С. 76 – 79.

8. Павлов, В. М. Использование измерительных полозов для определения параметров токосъема в ходе линейных испытаний высокоскоростного поезда «Сапсан» [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении: Сб. науч. тр. – М.: Интекст, 2010. – С. 109 – 117.

9. Мещеряков, В. А. Предпосылки получения статистически достоверных данных в ходе имитационного моделирования токосъема [Текст] / В. А. Мещеряков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – ВЭЛНИИ. – М. – 2013. – № 2 (66). – С. 104 – 121.

10. Деняк, О. А. Множественный регрессионный анализ методом Брандона в EXCEL [Текст] / О. А. Деняк // Логистика: современные тенденции развития. Материалы междунар. науч.-практ. конф. / ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. – СПб, 2016. – С.108 – 111.

11. MathWorks. Neural Network Toolbox Documentation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (Дата обращения 13.02.2018).

12. Swingler, K. Applying neural networks: a practical guide / K. Swingler, M. Kaufman. – San Francisco. – 1996, – 303 p.

13. Чучуева, И. А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобию [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.13.18 / Ирина Александровна Чучуева. – М., 2012. – 242 с.

14. List of Neural Network Toolbox functions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/index.php> (Дата обращения 13.02.2018).

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 N 877-r «O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda» (Ordinance of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 N 877-r «On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030»).

2. Kudryashov E. Information support of the life cycle of the contact network based on the finite element mathematical model [Informacionnoe soprovozhdenie zhiznennogo cikla kontaktnoj seti na osnove konechno-ehlementnoj matematicheskoy modeli]. *Current-acquisition and traction power supply in high-speed DC motion: Sat. sci. works of JSC VNIIZhT*. Moscow: Intetext, 2010, pp. 52 – 66.

3. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Perfection of a technique for studying wave processes in a contact suspension based on a finite element model [Sovershenstvovanie metodiki issledovaniya volnovykh protsessov v kontaktnoj podveske na osnove konechno-`elementnoj modeli]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 1, pp. 30 – 37.
4. Grigoriev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Mathematical modeling of the mechanical interaction of current collectors and contact suspension for high-speed electrified railways [Matematicheskoe modelirovanie mehanicheskogo vzaimodejstviya tokopriemnikov i kontaktnoj podveski dlja skorostnyh `elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie – Scientific and technical statements of SPbPU. Science and education*, 2012, no. 4 (159), pp. 155 – 162.
5. Zhigang Liu, Song Y., Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary. *J. Mod. Transport*, 2018, no. 26 (1), pp. 1 – 23.
6. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. A technique for assessing the functional readiness of a current collection system for high-speed sections of main railways [Metodika otsenki funktsional'noj gotovnosti sistemy tokos"ema skorostnyh uchastkov magistral'nyh zheleznyh dorog]. *Research Institute of Railway Engineering. transp.* Moscow, 2012, no 1, pp. 27 – 32.
7. Sidorov O. A., Pavlov V. M., Smerdin A. N., Zarenkov S. V., Golubkov A. S. The use of digital measuring instruments to determine the dynamic characteristics of current collection devices [Primenenie tsifrovyyh sredstv izmereniya dlja opredeleniya dinamicheskikh harakteristik ustroystv tokos"ema]. *Transport Urala – Transport of the Urals*. 2007, no 4, pp. 76 – 79.
8. Pavlov V. M., Smerdin A. N. Use of measuring strips for determining current collector parameters during linear tests of the Sapsan high-speed train [Ispol'zovanie izmeritel'nyh polozov dlja opredeleniya parametrov tokos"ema v hode linejnyh ispytaniy vysokoskorostnogo poezda «Sapsan»]. *Current-current and traction power supply for high-speed traffic: Sat. sci. tr.* Moscow: Intetext, 2010, pp. 109 – 117.
9. Meshcheryakov V.A., Smerdin A.N., Golubkov A.S. The prerequisites for obtaining statistically reliable data during the simulation of the current collector [Predposylki poluchenija statisticheskogo dostovernogo dannogo v hode imitatsionnogo modelirovaniya tokos"ema]. *Vestnik of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Industry*. 2013, no 2 (66), pp. 104 – 121.
10. Denyak O. A. Multiple regression analysis by the Brandon method in EXCEL [Mnozhestvennyj regressionnyj analiz metodom Brandona v EXCEL]. *Logistics: current trends of development. Part 1: materials of the XV International. scientific-practical. Conf. 7, April 8, 2016: Mat. doc. - SPb.: Publishing House GUMRF them. adm. S.O. Makarova*. 2016, pp.108 – 111.
11. MathWorks. Neural Network Toolbox Documentation. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (Date of circulation 13.02.2018).
12. Swingler K. Applying neural networks: a practical guide / Morgan Kaufman, San Francisco, 1996, 303 p.
13. Chuchueva I. A. Model' prognozirovaniya vremennyh rjadov po vyborke maksimal'nogo podobija (Model of forecasting time series for a sample of maximum similarity). *Cand. Thesis*, Moscow, 2012, 242 p.
14. List of Neural Network Toolbox functions. Access mode: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/index.php> (Date of circulation 13.02.2018).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

«Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
ОмГУПС.

Ермачков Глеб Романович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железно-
дорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (929) 369 06-17.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Ermachkov Gleb Romanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electricity
supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (929) 369 06-17.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
ОмГУПС.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Smerdin Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, associate professor
of the department «Electricity supply of railway
transport», OSTU.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного
транспорта», ОмГУПС.

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
department «Electricity supply of railway transport»,
OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Применение нейронных сетей при моделировании
системы токосъема на электрифицированных железных
дорогах [Текст] / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков и др. // *Известия Транссиба* / Омский гос. ун-т путей сообще-
ния. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 69 – 79..

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yermachkov G.R., Smerdin A.N., Golubkov A.S., Si-
dorov O.A. Application of neural networks at simulation of
a system of current collection on electric railways. *Journal
of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 1, no 33,
pp. 69 – 79 (In Russian).

УДК 629.064.5

А. Л. Каштанов, Н. Г. Ананьева

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аннотация. В статье дана характеристика текущего состояния в электросетевом комплексе нетягово-
го электроснабжения железнодорожного транспорта. Показаны основные недостатки существующей
системы учета электроэнергии в распределительных сетях 0,4 – 10 кВ. Рассмотрены основные направления
по инновационному развитию электросетевого комплекса нетяговой энергетики, в том числе направленные на
повышение энергоэффективности процесса преобразования, передачи и потребления электрической энергии за
счет управления режимами работы распределительных сетей. Приведено описание основных принципов
построения «Цифрового района электроснабжения».

Ключевые слова: электросетевой комплекс, железнодорожный узел, учет электроэнергии, оперативно-
технологическое управление.

Alexey L. Kashtanov, Nadezda G. Ananieva

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS OF RAILWAY JUNCTIONS. PROBLEMS AND SOLUTIONS

Abstract. The article describes the current state of railway non-traction electric power supply system in the electric grid complex. The main drawbacks of the existing electricity metering system in 0.4-10 kV distribution networks are shown. The main directions of non-tractive electric grid complex innovative development are considered, including directed to increase the efficiency of electric energy transformation, transmission and consumption processes due to the management of distribution networks operating modes. The basic principles of "Digital district power supply" constructing are given.

Keywords: power grid complex, railway junction, electric energy measuring, operational and technological control.

Холдинг «Российские железные дороги» является одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в России. В 2017 г. потребление ОАО «РЖД» только электрической энергии составило 49,9 млрд кВт·ч, т. е. 4,6 % от объема электропотребления в России. Главным видом деятельности холдинга являются перевозки, поэтому основной объем энергоресурсов расходуется на тягу поездов. При этом нужно помнить о том, что без надежной работы структурных подразделений дирекции инфраструктуры, а следовательно, и нетяговой энергетики невозможна нормальная работа железнодорожного транспорта в целом.

В 2016 г. была актуализирована Энергетическая стратегия ОАО «РЖД», устанавливающая основные принципы развития энергетики железнодорожного транспорта [1 – 3]. Если внимательно изучить приоритетные задачи стратегии, то можно увидеть, что значительная их часть напрямую затрагивает систему нетягового энергоснабжения. В число таких задач входят

минимизация рисков сбоев в энергообеспечении подразделений функциональных филиалов;

оптимизация затрат в стационарной энергетике;

качественное улучшение структуры управления потреблением ТЭР, выработкой и транспортировкой энергоресурсов на основе использования современных информационных технологий, систем учета, прогрессивных методов нормирования и мониторинга потребления ТЭР;

оснащение энергосетевого комплекса холдинга эффективными техническими средствами и автоматизированными технологическими системами;

гармоничное и эффективное взаимодействие холдинга с субъектами энергетического рынка страны и производителями энергоресурсов;

усиление работы с электросетевыми компаниями и системным оператором по синхронизации действий в части обеспечения надежности энергоснабжения железных дорог, в том числе при возникновении чрезвычайных и аварийных ситуаций.

Функционирование энергосистемы РФ основано на сочетании действующей под государственным контролем технологической и коммерческой инфраструктуры, с одной стороны, и взаимодействующих между собой, в конкурентной среде организаций, осуществляющих выработку и сбыт электроэнергии (рисунок 1) [4].

Генерирующие компании осуществляют выработку и реализацию электроэнергии на оптовом или розничных рынках сбытовым организациям либо крупным конечным потребителям – участникам оптового рынка. Сбытовые организации приобретают электроэнергию на оптовом и розничных рынках и продают ее конечным потребителям. Купля и продажа электроэнергии и мощности генерирующими компаниями, сбытовыми организациями, сетевыми организациями и крупными потребителями осуществляется в соответствии с установленными постановлением Правительства Российской Федерации № 643 от 24.10.2003 «Правилами

работы оптового рынка электроэнергии и мощности» и Договором о присоединении к торговой системе оптового рынка электроэнергии и мощности.



Рисунок 1 – Структурная схема функционирования рынка электрической энергии

В соответствии с Федеральным законом от 26.03.2003 № 36-ФЗ (ред. от 05.04.2013) «Об особенностях функционирования электроэнергетики в переходный период» совмещать деятельность по передаче электрической энергии и оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике с деятельностью по производству и купле-продаже электрической энергии с даты окончания переходного периода реформирования электроэнергетики (2011 г.) группам лиц и аффилированным лицам в границах одной ценовой зоны оптового рынка запрещается. Таким образом, совмещение в пределах одной ценовой зоны естественно-монопольных видов деятельности с конкурентными не допускается, в то же время в конкурентных видах деятельности объединение разных видов деятельности возможно (например, генерирующая компания может владеть сбытовыми организациями, но не может владеть сетями).

Электроэнергетический комплекс «РЖД» находится в условиях сложного взаимодействия с различными хозяйствующими субъектами и разделен по видам деятельности, в том числе на услуги по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и услуги по передаче электроэнергии сторонним потребителям.

Совмещение данных видов бизнеса вызывает проблему для ОАО «РЖД» в виде несоблюдения в полной мере требований действующего законодательства в части раздельного учета затрат по электросетевой деятельности и технологическому присоединению потребителей к электросетям.

Работы, выполняемые в рамках энергетического обследования структурных подразделений ОАО «РЖД», позволили получить фактическую картину дел, сложившуюся в стационарной электроэнергетике железнодорожного транспорта.

Во-первых, усредненные потери электрической энергии при ее передаче железнодорожным потребителям составили:

- за девять месяцев 2014 г. 333,8 млн кВт·ч (6,8 % от объема электроэнергии, предъявленного стационарным потребителям ОАО «РЖД»);
- в 2015 г. 366,6 млн кВт·ч (7,83 %);
- в 2016 г. 371,5 млн кВт·ч (7,87 %);
- в 2017 г. 327,0 млн кВт·ч (7,22 %).

Основной причиной сохранения уровня потерь с одновременным снижением норматива по объему услуг при передаче электроэнергии, что в свою очередь приводит к повышению издержек ОАО «РЖД», является «старение» оборудования. Анализ текущего состояния устройств электроснабжения, участвующих в передаче электроэнергии, показал, что более 15000 объектов основных средств имеет 100 %-ный финансовый износ (по состоянию на 1 января 2017 г.). Причиной данного положения является недостаточность капитальных вложений в реконструкцию устройств электроснабжения, непосредственно не обеспечивающих перевозочный процесс.

Во-вторых, масштабные инвестиционные проекты по внедрению автоматизированных систем учета электрической энергии бесспорно позволили значительно повысить эффективность энергосетевой и энергосбытовой деятельности. Но при этом до настоящего времени не реализованы базовые функции анализа и управления электропотреблением по их данным, да и сама система учета зачастую не выполняет полностью даже своего прямого назначения – организации достоверного учета электроэнергии.

В-третьих, одним из приоритетных и инновационных направлений электроэнергетики является развитие «цифровых распределительных сетей» (далее – Цифровой РЭС), реализованных на принципах Smart Grid систем, с целью повышения надежности электроснабжения, снижения времени ликвидации аварий, сокращения недоотпуска электрической энергии и оптимизации эксплуатационных затрат [5, 6]. Основные этапы внедрения технических средств и условия построения Цифрового РЭС представлены на рисунке 2.

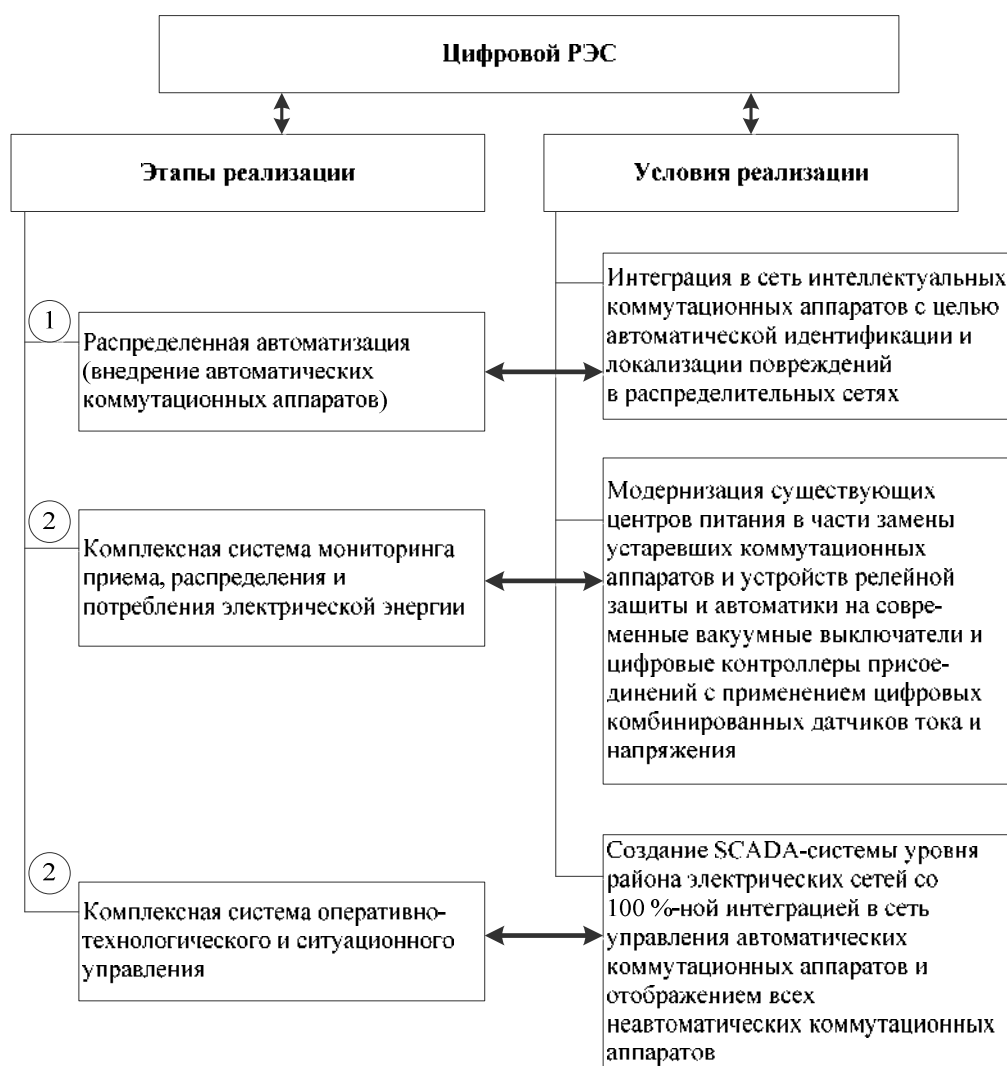


Рисунок 2 – Обобщенная структура построения Цифрового РЭС

Существующее оборудование электросетевого комплекса ОАО «РЖД» не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к «цифровым сетям». Учитывая значительный фактический износ устройств электроснабжения, участвующих в передаче электроэнергии, и необходимость их замены, в рамках инвестиционного проекта «Обновление оборудования и устройств электроснабжения» следует обеспечить соответствие внедряемого оборудования современным технологиям.

Далее более подробно рассмотрим основные проблемы, имеющие место в распределительных сетях нетяговой энергетики, и возможные пути их решения.

Организация работ в распределительных сетях нетяговой энергетики. В соответствии с энергетической стратегией перед ОАО «РЖД» в рамках развития электросетевого комплекса необходимо решение следующих задач:

- обеспечение надежности электроснабжения потребителей, участвующих в перевозочном процессе;

- соблюдение требований законодательства Российской Федерации в области электроэнергетики и предоставления услуги по передаче электрической энергии сторонним потребителям;

- повышение клиентоориентированности при предоставлении услуг по передаче электрической энергии сторонним потребителям;

- обеспечение соответствия требованиям стандартов отнесения к электросетевым организациям.

Электросетевой комплекс железнодорожного узла имеет сложную с точки зрения организации структуру. Выполнение работ в условиях большого количества оборудования, возможных схем и режимов его работы требует наглядности всего технологического процесса. При этом оперативное управление объектами электросетевого хозяйства железнодорожных узлов ограничено уровнем источников питания (например, тяговые или центральные распределительные подстанции). Информацию о том, в каком режиме работают распределительные сети (например, схема питания, количество работающих трансформаторов, схем секционирования подстанций), можно получить только со слов персонала, обслуживающего районы электроснабжения.

Сложность в организации работ вызывает отсутствие выверенной базы данных по потребителям с указанием их установленной мощности и привязкой к трансформаторным подстанциям. Это в свою очередь делает невозможным достоверную оценку свободной мощности на объектах стационарного электроснабжения инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД», расчет режимов работы электросетей и, в том числе, достоверное определение технических и коммерческих потерь электрической энергии, оптимальный выбор мест установки энергосберегающих устройств и оценку эффективности их работы [7].

Все это влияет на надежность и эффективность работы электросетевого комплекса и снижает оперативность выявления и устранения аварийных режимов работы.

Поскольку внедрение SCADA-систем дорого, а создание мнемосхем требует ручной прорисовки электросетевых объектов и оборудования и не всегда удобно при оперативных переключениях, решением может стать внедрение приложений, позволяющих формировать коммутационные и геоинформационные модели объектов электросетевого хозяйства. Такое приложение позволит

- создавать модели электрической сети с использованием символов условного графического обозначения объектов: распределительных и трансформаторных подстанций, линий электропередач, разъединителей, выключателей и т. д.;

- отображать оперативную информацию о режимах работы распределительной сети;

- формировать базы данных по оборудованию и абонентам с привязкой их к трансформаторным подстанциям и многое другое.

Организация системы учета электрической энергии в распределительных сетях железнодорожных узлов. В рамках организации системы учета приоритетными направлениями повышения доходов от услуг по передаче электрической энергии сторонним потребителям являются

оснащение информационно-измерительными комплексами точек поставки/покупки электроэнергии по границам балансовой принадлежности электрических сетей ОАО «РЖД», в первую очередь напряжением 0,4 кВ, где на отдельных участках уровень потерь электроэнергии значительно превышает расчетные значения;

совершенствование системы учета электроэнергии, потребляемой структурными подразделениями филиалов ОАО «РЖД».

Как уже было сказано, внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электрической энергии железнодорожных узлов и розничного рынка электроэнергии позволило значительно повысить достоверность учета [8, 9]. Однако в условиях постоянно проводимой в ОАО «РЖД» структурной реорганизации (например, выделение ОАО «СТМ-Сервис», «ТМХ-Сервис», «РесурсАвтотранс») система учета электроэнергии не всегда оперативно реагирует на происходящие изменения и не позволяет организовать достоверный коммерческий учет электроэнергии. Расход электроэнергии при этом определяется договорными значениями или вообще ошибочно перераспределяется по различным структурным подразделениям. Все это приводит к тому, что возрастают фактические коммерческие потери электроэнергии, снижается эффективность системы анализа приема и распределения электроэнергии как в распределительных сетях железнодорожного узла в целом, так и в обособленных структурных подразделениях в отдельности.

Следствием разделения функций обслуживания распределительных сетей и организации учета электроэнергии является несогласованность в работе дистанций электроснабжения и дирекций по энергообеспечению «Трансэнерго». Например, это проявляется в том, что отсутствует единая база абонентов с привязкой их к точкам поставки электроэнергии. Как показывает практика, получить достоверную информацию о потребителях и трансформаторных подстанциях, от которых они получают питание, не всегда возможно. Встречаются случаи, когда название объектов в базе данных «Трансэнерго» не соответствует действительности, что в свою очередь вызывает путаницу при идентификации объекта, например, в рамках энергетического обследования структурных подразделений ОАО «РЖД».

Важную роль в повышении достоверности учета электроэнергии в распределительных сетях железнодорожных узлов играет уровень подготовки специалистов линейных подразделений «Трансэнерго», т. е. контроллеров.

Замена индукционных счетчиков на электронные повысила достоверность учета электроэнергии и позволила устранить типичные причины недоучета электроэнергии у потребителей, например, такой, как обратный порядок чередования фаз напряжения. При этом достаточно вариантов недоучета электроэнергии, характерных и для электронных счетчиков. К ним можно отнести также:

- неверный выбор коэффициента трансформации трансформаторов тока $k_{т.т}$ (согласно ПУЭ он должен быть в пределах 20 – 80 %);
- изменение $k_{т.т}$ в сторону уменьшения из-за межвитковых замыканий;
- включение одного из элементов счетчика в противофазе;
- обрыв в токовой цепи счетчика;
- плохой контакт, что увеличивает сопротивление токовой цепи;
- короткое замыкание токовой цепи у электронных счетчиков.

Таким образом, для повышения эффективности работ по повышению достоверности определения отпущенной электроэнергии необходимо обеспечить контроллеров линейных отделов «Трансэнерго» приборами для определения правильности схем подключения счет-

чиков и обучить их методикам поверки приборов учета электроэнергии. Для поддержания соответствующего квалификационного уровня необходимо организовать периодическую переподготовку работников линейных отделов «Трансэнерго» и обеспечить систематический контроль эффективности их работы.

Повышение энергоэффективности процесса преобразования, передачи и потребления электрической энергии за счет управления режимами работы распределительных сетей. Как уже было сказано, третьим основным этапом внедрения технических решений по построению Цифрового РЭС является разработка и реализация комплексной системы оперативно-технологического и ситуационного управления. По данному этапу можно выделить два направления развития:

внедрение и расширение функциональных возможностей систем телемеханики и телеуправления (автоматизация процессов управления распределительными сетями посредством внедрения цифровых интеллектуальных коммутационных аппаратов и технологий);

разработка и внедрение автоматизированных систем анализа режимов работы распределительных сетей [10].

Первое направление требует значительных инвестиций, связанных с закупкой инновационного цифрового оборудования. Его реализация целесообразна только в случае полной модернизации распределительных сетей железнодорожного узла.

Второе направление вполне реализуемо при существующем оборудовании и действующей схеме электроснабжения железнодорожных узлов. Примером такого развития может быть внедрение автоматизированных рабочих мест метролога, реализующих функции контроля и анализа системы учета электроэнергии и автоматизацию расчетов режимов работы объектов электросетевого хозяйства.

Учитывая фактическое положение дел, сложившееся в распределительных сетях системы непрямого электроснабжения (высокий уровень коммерческих потерь электроэнергии, неудовлетворительное состояние устройств электроснабжения, участвующих в передаче электроэнергии), а также задачи, поставленные перед ОАО «РЖД» в рамках развития электросетевого комплекса, требуется качественное улучшение структуры управления, в том числе комплексной системы мониторинга, оперативно-технологического и ситуационного управления приема и распределения электроэнергии.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. – № 2537р. – 76 с.
2. Каштанов, А. Л. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, А. А. Комяков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 141 – 147.
3. Никифоров, М. М. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, А. А. Комяков // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. научн.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 159 – 165.
4. Пугина, О. А. Организационно-правовая структура электроэнергетики в России [Текст]: Учебное пособие / О. А. Пугина / Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – 80 с.
5. Черемисин, В. Т. Совершенствование методов и средств управления транспортом и распределением электроэнергии в системах электроснабжения стационарных потребителей

железных дорог: Монография [Текст] / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – 169 с.

6. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью / НТЦ ФСК ЕЭС. – М, 2012. – 51 с.

7. Подход к оценке эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях электроснабжения железнодорожных узлов с учетом производственных и климатических факторов [Текст] / А. А. Комков, В. В. Эрбес и др. // 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. – С. 257 – 263.

8. Каштанов, А. Л. Повышение эффективности контроля электропотребления на тягу поездов и нетяговые нужды по данным АСКУЭ: Монография [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, И. Ю. Норкин / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – 118 с.

9. Черемисин, В. Т. Техничко-экономический аспект внедрения АСКУЭ на железнодорожном транспорте [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 3. – С. 51 – 53.

10. Каштанов, А. Л. Автоматизированный программный комплекс по контролю и управлению энергопотреблением в границах железнодорожного узла по данным АСКУЭ [Текст] / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, И. Ю. Норкин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2(2). – С. 71 – 76.

References

1. The energy strategy of «Russian Railways» holding for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznnye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda]. *Approved by the decree of JSC Russian Railways on December 14, 2016*, no. 2537 p, 76 p.

2. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Komyakov A. A. Update of the energy strategy of «Russian Railways» [Aktualizatsiya energeticheskoy strategii kholdinga «Rossiyskiye zheleznnye dorogi»]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii posvyashchennoy Dnyu rossiyskoy nauki* (Materials of the scientific-practical conference devoted to the Day of Russian Science). Omsk, 2015, pp. 141 – 147.

3. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Komyakov A. A. On the work on updating the energy strategy of «Russian Railways» holding for the period until 2020 and for the future until 2030 [O rabote po aktualizatsii energeticheskoy strategiya holdinga «Rossijskie zheleznnye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii: «Povishenie energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh system»* (Materials of the scientific-practical conference: «Increase of energy efficiency of land transport systems»). Omsk, 2016, pp. 159 – 165.

4. Pugina O. A. *Organizatsionno-pravovaya struktura elektroenergetiki v Rossii* [Organizational and legal structure of the electric power industry in Russia]. Tambov: TGTU Publ., 2014, 80 p.

5. Cheremisin V. T., Tretyakov E. A. *Sovershenstvovaniye metodov i sredstv upravleniya transportom i raspredeleniyem elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya statsionarnykh potrebiteley zheleznnykh dorog* [Perfection of methods and means for managing transport and electric power distribution in the power supply systems of stationary railroad consumers]. Monograph. Omsk: OSTU, 2017, 169 p.

6. *Osnovnyye polozheniya kontseptsii intellektual'noy energosistemy s aktivno-adaptivnoy set'yu* [The main provisions of the concept of an intelligent power system with an active-adaptive network]. M.: NTC Federal Grid Company of Unified Energy System, 2012. – 51 p.

7. Komyakov A. A., Erbes V. V., Kashtanov A. L., Sungkvyn Ch. Approach to the assessment of the efficiency of energy-saving devices in power supply networks of railway junctions, taking into account production and climatic factors [Podkhod k otsenke effektivnosti raboty energosberegayushchikh ustroystv v setyakh elektrosnabzheniya zheleznodorozhnykh uzlov s uchetom proizvodstvennykh i klimaticheskikh faktorov]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii: «Pribory i metody izmereniy, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific-practical conference: «Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport»). Omsk, 2013, pp. 257 – 263.

8. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Norkin I. Yu. *Povysheniye effektivnosti kontrolya elektropotrebleniya na tyagu poyezdov i netyagovyye nuzhdy po dannym ASKUE* [Increasing the effectiveness of the electric power consumption for traction and non-traction needs control using the ASKUE data]. Monograph. Omsk: OSTU, 2010, 118 p.

9. Cheremisin V. T., Nikiforov M.M., Kashtanov A. L. Technical and economic aspect of the introduction of ASKUE in railway transport [Tekhniko-ekonomicheskii aspekt vnedreniya ASKUE na zheleznodorozhnom transporte]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*. 2007, no. 3, pp. 51 – 53.

10. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Norkin I. Yu. Automated software package for monitoring and managing of the electric power consumption n within the boundaries of the railway junction using the ASKUE data [Avtomatizirovannyi programmnyi kompleks po kontrolyu i upravleniyu energopotrebleniyem v granitsakh zheleznodorozhnogo uzla po dannym ASKUE]. *Izvestiya Transsiba – Transsib Railway Studies*. 2010, no. 2 (2). pp. 71 – 76.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на ж.-д. транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Ананьева Надежда Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Программист кафедры «Автоматика и системы управления», аспирант, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89

E-mail: nadyushaa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Ananieva Nadezda Gennadievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Graduate student of department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89

E-mail: nadyushaa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Каштанов, А. Л. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов. Проблемы и пути их решения [Текст] / А. Л. Каштанов, Н. Г. Ананьева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 79 – 87.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kashtanov A. L., Ananieva N. G. Electrical distribution networks of railway junctions. Problems and solutions. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 79 – 87 (In Russian).

УДК 621.331

УДК 629.4

М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, Р. В. Сергеев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИКАТОРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЯГОВЫХ РЕСУРСОВ

***Аннотация.** В статье приведены основные положения методики определения индикаторов энергоэффективности электровозов. Представлены результаты расчетов индикаторов для электровозов серий ЗЭС5К, ЭП2К и ЭЭС6 применительно к действующим участкам железных дорог. Предложенный подход может быть использован для установления уровня энергоэффективности различных серий электроподвижного состава и их объективного сравнения при эксплуатации на различных участках с поездами различных масс с целью дальнейшего создания автоматизированной системы оптимизации использования тяговых ресурсов ОАО «РЖД».*

***Ключевые слова:** энергетическая эффективность, тяга поездов, электровозы, расчетно-аналитический метод, расход электроэнергии.*

Mikhail M. Nikiforov, Alexander S. Vilgelm, Roman V. Sergeev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF INDICATORS OF ENERGY EFFICIENCY ELECTRIC VEHICLES FOR OPTIMIZATION OF USE TRACTION RESOURCES

***Abstract.** The article contains the main provisions of the methodology for determining the indicators of electric locomotives energy efficiency. The results of indicators calculations for electric locomotives of series ZES5K, EP2K and EES6 are presented with reference to the current sections of railways. The proposed approach can be used to establish the level of energy efficiency of various series of electric rolling stock and their objective comparison when operating at different sites with trains of various masses with the aim of further creating an automated system for optimizing the use of traction resources of JSCo Russian Railways.*

***Keywords:** energy efficiency, traction of trains, electric locomotives, calculation and analytical method, electricity consumption.*

На сети железных дорог в настоящее время на одних и тех же участках эксплуатируются разные серии электроподвижного состава. С целью повышения потенциала энергетической эффективности в соответствии с действующей редакцией энергетической стратегии ОАО «РЖД» [1] на сети железных дорог осуществляется планомерная замена парка электровозов, а также разработка новых серий электроподвижного состава, в том числе электровозов с асинхронным и синхронным приводом, а в перспективе – мультисистемных грузовых и пассажирских электровозов. В связи с этим целесообразной является разработка системы оценки, позволяющей выполнять объективное сравнение уровней энергоэффективности различных серий электровозов при их эксплуатации на различных участках железных дорог с учетом параметров профиля пути, характеристик системы тягового электроснабжения, текущих и перспективных условий организации движения поездов. Это в перспективе позволит оптимизировать использование тяговых ресурсов на сети железных дорог ОАО «РЖД» и выполнить целевые задания, установленные в энергостратегии ОАО «РЖД» и других действующих нормативных документах Российской Федерации [2, 3].

Для реализации поставленной задачи необходимо определить критерии энергоэффективности, по которому будет выполняться сравнение серий электровозов для оптимизации парка электровозов на конкретных участках железных дорог.

В качестве основного показателя, характеризующего эффективность потребления электроэнергии на тягу поездов, принято использовать удельный расход электроэнергии [4]. Сравнительный анализ статистических значений удельного расхода для электровозов серии ВЛ10 с поездами одинаковой массы и одинаковой нагрузкой на ось вагона для различных участков железных дорог может различаться в полтора – два раза [5]. При этом алгоритм подробного анализа данных об удельном расходе электроэнергии на тягу поездов на уровне локомотивных депо является трудоемким и многоитерационным [6].

Что касается индикатора энергетической эффективности, то под этим термином понимаются затраты энергии на единицу произведенной продукции или выход технологического процесса для промышленного производства [7]. Индикаторы энергоэффективности отражают отношение полезного эффекта использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, и по своей сути представляют собой удельное энергопотребление. Основное назначение индикаторов энергоэффективности состоит в обеспечении возможности самостоятельного анализа и мониторинга энергоэффективности технического средства (машины), сравнения индикаторов энергоэффективности отдельных подразделений, процессов и установок в промышленном производстве.

Для обеспечения возможности анализа и мониторинга энергоэффективности электровозов, эксплуатируемых и закупаемых в настоящее время ОАО «РЖД», и проверки их соответствия требованиям энергоэффективности были разработаны «Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза» [8] и «Методика подтверждения индикатора энергоэффективности электровоза» [9], утвержденные старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В. А. Гапановичем 26 декабря 2014 г. В основу первой методики положен расчетно-аналитический метод, вторая методика основана на экспериментальном получении измеряемых величин, расчете экспериментального индикатора энергоэффективности электровоза и определении относительной погрешности расчета.

Обоснование расчетно-аналитического метода для определения и подтверждения индикаторов энергоэффективности электровозов представлено в источнике [10], методология расчета индикаторов для типовых профилей пути в [11], методология подтверждения расчетных значений индикаторов в [12, 13], особенности расчета индикаторов для электровозов с асинхронным тяговым приводом описаны в [14], а результаты определения индикаторов для выпускаемых в настоящее время серий электровозов – в [15].

Исходными данными для определения индикаторов согласно названным выше методикам являются:

- 1) тяговые, тормозные, токовые характеристики электровозов;
- 2) характеристики оборудования собственных нужд электровозов;
- 3) основные технические характеристики электровозов из Руководства по эксплуатации, такие как число тяговых двигателей и осевая формула, масса электровоза, конструкционная скорость, вид электрического торможения, число ступеней ослабления поля и др.;
- 4) характеристики профиля пути (в расчетах согласно методикам используются три условных типовых профиля пути, представленных в работе [15]).

Данный подход позволяет учесть основные факторы, определяющие энергоэффективность электровозов (характеристики электровоза и профиля пути, массу состава, скоростной режим ведения поезда и др.). При этом расчет индикаторов энергоэффективности электровозов основан на определении отдельных составляющих расхода электроэнергии с последующим их суммированием, а именно: значение индикаторов энергоэффективности электровоза складывается из удельного расхода электроэнергии тяговыми двигателями

(удельного расхода на разгон поезда, на движение в установившихся тяговых режимах за вычетом величины удельной рекуперации) и удельного расхода электроэнергии на собственные нужды электровоза.

Расчет выполняется для трех условных типовых профилей пути, отличающихся друг от друга сложностью, с последующим определением средневзвешенного значения индикатора, исходя из процентного соотношения участков электрифицированных железных дорог по принадлежности к соответствующим типам.

При этом если серия электровоза разработана для применения на конкретном участке сети железных дорог, то расчет индикатора для данной серии выполняется для условного участка, которому данный участок соответствует по характеристикам своего профиля.

Например, запускаемая в настоящее время серия электровозов 4ЭС5К предназначена для эксплуатации на БАМе. Соответственно значение индикатора для электровозов 4ЭС5К должно определяться для наиболее сложного, четвертого условного типа профиля пути, характеризующегося максимальным значением руководящего уклона 11,0 ‰.

Любой действующий участок электрифицированных железных дорог РФ по сложности своего профиля может быть отнесен к одному из типовых условных участков, однако участка с профилем пути, абсолютно идентичным любому из условных, на сети дорог не существует.

Поэтому с целью реализации идеи объективного сравнения уровней энергоэффективности различных серий электровозов для повышения эффективности использования тяговых ресурсов при эксплуатации тягового подвижного состава на конкретных участках железных дорог предлагается использовать алгоритмы расчетов индикаторов энергоэффективности, заложенные в упомянутых выше методиках, применительно не к типовым профилям пути, а к фактическим профилям действующих участков железных дорог.

Предлагаемый алгоритм расчета включает в себя следующие действия:

выполняется спрямление и приведение плана и профиля пути экспериментального участка в соответствии с Правилами тяговых расчетов [16];

на тяговых и тормозных характеристиках электровоза строятся кривые основного сопротивления движению от скорости в зависимости от величин подъемов и спусков экспериментального участка (рисунок 1);

дальнейшие расчеты для экспериментального участка проводятся в соответствии с методологией, которая будет приведена ниже.

По тяговым характеристикам электровоза $F_k(V)$ определяются расчетная скорость движения V_p и расчетная сила тяги $F_{кр}$ в точке пересечения тяговой характеристики $F_k(V)$ на расчетной ходовой позиции контроллера машиниста и кривой ограничения по сцеплению $F_{сч}(V)$ (точка 1 на рисунке).

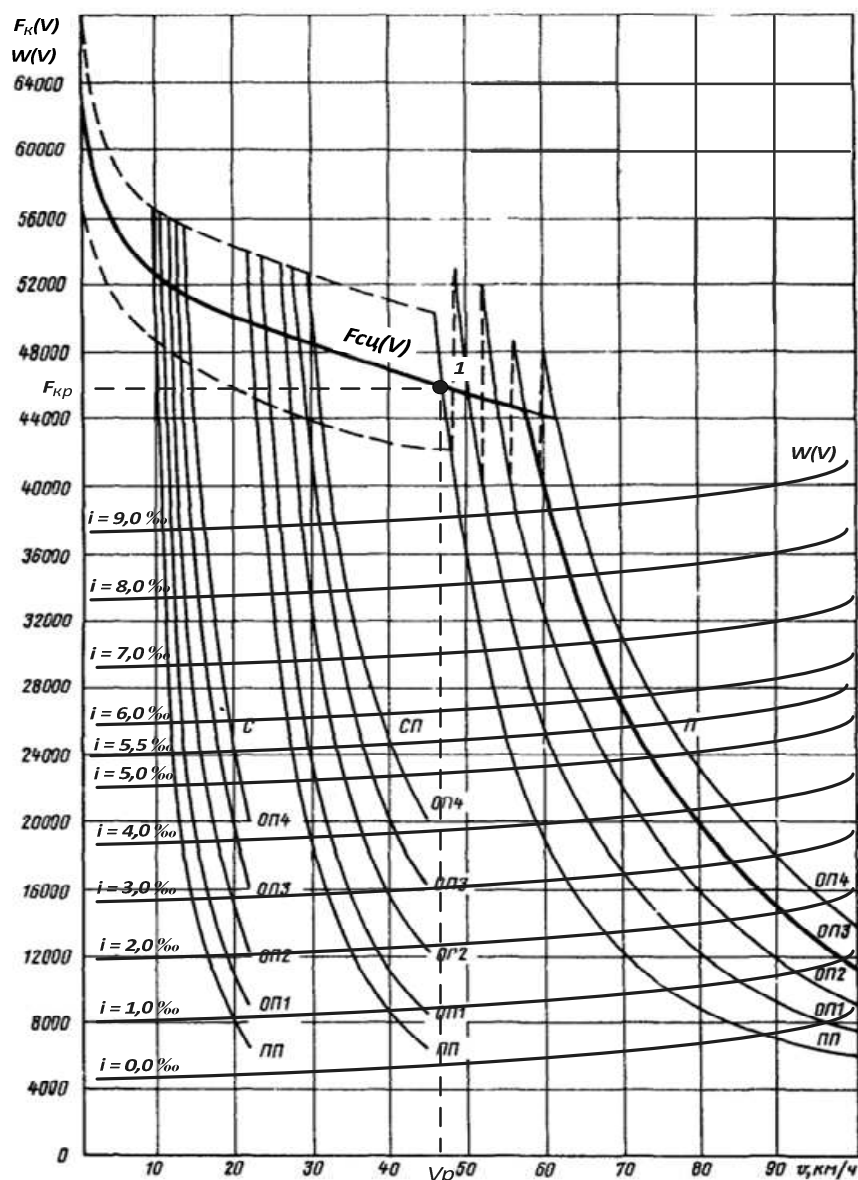
Для расчетной скорости V_p определяются основное удельное сопротивление движению электровоза w'_0 и основное удельное сопротивление движению вагонов w''_0 для бесстыкового пути, а также дополнительное удельное сопротивление движению от подвагонных генераторов $w_{пг}$.

Определяется расчетная масса грузового состава для расчетной скорости движения V_p и величины расчетного подъема i_p . Масса состава пассажирских поездов принимается равной 900 т.

Далее на тяговых характеристиках электровоза $F_k(V)$ строятся кривые основного сопротивления движению от скорости (см. рисунок) – зависимости $W(V)$ для всех величин подъемов i_i на каждом элементе профиля расчетного участка, а на тормозных характеристиках электровоза $B(V)$ строятся кривые сил, действующих от уклонов.

Результаты определения режимов ведения поезда (позиции регулирования), расчетов расхода и рекуперации электроэнергии электровозом на условном участке с профилем определенного типа заносятся в таблицу по форме таблицы 1. Данные столбцов 1 – 3 задаются параметрами профиля расчетного участка. Первая строка заполняется для режима разгона до

первого значения установившейся скорости V_{y1} согласно формуле (2) [5], остальные – для каждого элемента профиля пути, начиная с первого элемента, на котором реализована данная установившаяся скорость V_{y1} .



Тяговые характеристики электровоза $F_k(V)$ с нанесенными кривыми основного сопротивления движению $W(V)$

По результатам расчетов и заполнения расчетной таблицы (см. таблицу 1) рассчитывается суммарная величина потребления электроэнергии тяговыми двигателями электровоза по формуле, кВт·ч:

$$A_{эд} = A_1 + A_2 - A_3. \quad (1)$$

Удельный расход электроэнергии $a_{эд}$ тяговыми двигателями электровоза на участке длиной S определяется по формуле, кВт·ч/10⁴ ткм:

$$a_{эд} = \frac{A_{эд} \cdot 10^4}{m_c \cdot S}. \quad (2)$$

Удельный расход электроэнергии на собственные нужды электровоза $a_{сн}$ определяется по формуле, кВт·ч/10⁴ ткм:

$$a_{с.н} = \frac{P_{с.н} \cdot k_{с.н} \cdot T \cdot 10^4}{m_c \cdot S}, \quad (3)$$

где $P_{с.н}$ – мощность собственных нужд электровоза, принятая по паспортным характеристикам электровоза, кВт;

$k_{с.н}$ – коэффициент использования оборудования собственных нужд электровоза. По результатам расшифровки данных, полученных с помощью регистраторов параметров движения, и анализа алгоритма работы вспомогательного оборудования различных типов электровозов принимать для грузовых электровозов постоянного тока $k_{с.н} = 0,63$, для грузовых электровозов переменного тока $k_{с.н} = 0,84$, для пассажирских электровозов постоянного тока $k_{с.н} = 0,44$, для пассажирских электровозов переменного тока $k_{с.н} = 0,64$;

T – суммарное время движения поезда с учетом движения в режимах выбега и торможения, ч.

Таблица 1 – Результаты расчета режимов ведения поезда, расхода и рекуперации электроэнергии электровозом на расчетном участке

Координата S , км	Длина элемента профиля l_i , км	Уклон i_i , ‰	Позиция контроллера машиниста	Установившаяся скорость V_{yi} , км/ч	Время хода по элементу профиля t_i , ч	Ток электровоза I_i , А	Расход энергии A_1, A_2 , кВт·ч	Рекуперация энергии A_3 , кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_1	l_p	I_1	–	V_{y1}	Δt	–	A_1	0
S_i	l_i	i_i	Π_i	V_{yi}	t_i	I_{ti}	A_{2i}	0
$S_{i+1} = S_i + l_i$	l_{i+1}	i_{i+1}	Π_{i+1}	$V_{y(i+1)}$	t_{i+1}	$-I_{p(i+1)}$	0	$A_{3(i+1)}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
S_n	l_n	i_n	Π_n	V_{yn}	t_n	I_{tn}	A_{2n}	0
Σ	–	–	–	–	T	–	A_2	A_3

Суммарный удельный расход электроэнергии a_s электровоза определяется по формуле, кВт·ч/10⁴ ткм:

$$a_s = a_{эд} + a_{с.н}. \quad (4)$$

Далее значение индикатора энергоэффективности электровоза выражается в кг у.т./10⁴ ткм брутто исходя из условия, что 1 кВт·ч = 0,123 кг у.т.

В качестве примера расчета индикатора энергоэффективности электровоза для действующего участка приведем результаты расчетов для электровоза серии ЗЭС5К с расчетной массой поезда 6300 т на участке Дальневосточной железной дороги протяженностью 15,1 км. Расчетные результаты определения индикатора энергоэффективности электровоза ЗЭС5К для действующего участка представлены в таблице 2.

На первом этапе было произведено спрямление и приведение плана и профиля пути экспериментального участка и выделены 60 элементов профиля, на которых были выполнены дальнейшие расчеты.

В первую строку таблицы 2 занесены расчетные результаты определения затрат энергии на разгон поезда до первого значения установившейся скорости $V_{y1} = 54,0$ км/ч. Так, в столбец 4 занесено расчетное время разгона $\Delta t = 0,109$ ч; в столбец 6 – расчетное значение расхода электроэнергии $A_1 = 177$ кВт·ч на разгон поезда.

Начиная со второй строки таблица 2 заполнена для движения в режимах тяги, рекуперации и выбега с установившимися значениями скоростей для каждого элемента профиля. Суммарное расчетное значение расхода электроэнергии на тягу A_2 составило 679 кВт·ч, сум-

марное расчетное значение рекуперации A_3 составило 12,5 кВт·ч. Расчетная величина расхода энергии на собственные нужды электровоза $A_{сн}$ составила 104,0 кВт·ч.

Таблица 2 – Результаты определения индикатора энергоэффективности электровоза ЗЭС5К для действующего участка Дальневосточной железной дороги

Номер элемента профиля	Результаты расчетов					
	позиция КМ	установившаяся скорость $V_{yи}$, км/ч	время хода по элементу профиля t_i , ч	ток I_i , А	расход энергии A_1, A_2 , кВт·ч	рекуперация энергии A_3 , кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7
Разгон	–	54	0,109	–	177	–
1	Зона 3	60	0,0016	95	3,76	–
2	0,5 зоны 4	56	0,0019	180	8,36	–
3	Зона 4 (ОП2)	61	0,0066	340	55,88	–
...	...	...	...	...	...	...
59	Зона 2	50	0,0059	50	7,38	–
60	Зона 2	43	0,0094	60	14,09	–
Σ	–	–	0,3214	–	679	12,5

Для расчета индикатора энергоэффективности пассажирского электровоза ЭП2К на действующем участке был выбран участок Свердловской железной дороги протяженностью 27,0 км. В результате спрямления и приведения профиля получилось 87 элементов. Расчетное значение времени разгона поезда до скорости 46 км/ч Δt составило 0,032 ч, расчетное значение расхода электроэнергии на разгон – $A_1 = 37$ кВт·ч. Суммарное расчетное значение расхода электроэнергии на тягу A_2 составило 357 кВт·ч. Рекуперация на электровозе ЭП2К не предусмотрена. Расчетная величина расхода энергии на собственные нужды электровоза $A_{сн}$ составила 15,4 кВт·ч.

Был выполнен расчет индикатора для электровоза 2ЭС6 для участка Свердловской железной дороги протяженностью 19,4 км с поездом критической массы 9000 т. В результате расчетов для спрямленного и приведенного профиля, состоящего из 57 элементов, суммарное расчетное значение расхода электроэнергии на разгон поезда A_1 составило 503 кВт·ч, значение расхода электроэнергии на тягу – $A_2 = 1485$ кВт·ч, суммарное расчетное значение рекуперации – $A_3 = 754$ кВт·ч. Расчетная величина расхода энергии на собственные нужды электровоза $A_{сн}$ составила 33,6 кВт·ч.

Результаты определения значений индикаторов энергоэффективности электровозов ЭП2К, 2ЭС6, ЗЭС5К сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты определения индикатора энергоэффективности электровозов

Значение показателя	Серия электровоза		
	ЭП2К	2ЭС6	ЗЭС5К
Расход энергии на разгон поезда			
Расчетное значение $A_{1р}$, кВт·ч	37,0	503,0	177,0
Расход энергии на тягу			
Расчетное значение $A_{2р}$, кВт·ч	357,0	1485,0	679,0
Рекуперация			
Расчетное значение $A_{3р}$, кВт·ч	–	754,0	12,5
Расход энергии на собственные нужды электровоза			
Расчетное значение $A_{снр}$, кВт·ч	15,4	33,6	104,0
Значение индикаторов энергоэффективности, кг у.т./10⁴ ткм брутто	20,6	7,3	8,6

Таким образом, значения индикаторов энергетической эффективности по рассматриваемым сериям электровозов составили, кг у.т./10⁴ ткм брутто: для ЭП2К – 20,6; 2ЭС6 – 7,3; 3ЭС5К – 8,6.

Расчетные значения индикаторов энергоэффективности рассмотренных выше электровозов и некоторых других серий, определенные для типовых условных профилей пути, а также суммарное средневзвешенное значение по этим профилям приведены в таблице 4.

Отметим, что итоговые значения индикаторов (см. таблицу 4), рассчитанные для условных типовых профилей, несущественно отличаются от значений, полученных для конкретных участков железных дорог. При этом расчеты индикаторов для действующих участков железных дорог, результаты которых приведены в статье, позволяют повысить точность определения уровня энергоэффективности электровозов применительно к действующим или планируемым условиям их эксплуатации.

Таблица 4 – Результаты определения значений индикаторов энергоэффективности электровозов различных серий

Серия электровоза	Индикаторы энергоэффективности электровозов, кг у.т./10 ⁴ ткм брутто			
	по I – II типам профилей	по III типу профиля	по IV типу профиля	итоговый
рассмотренных в статье серий электровозов				
3ЭС5К	4,5	12,9	14,6	9,0
ЭП2К	14,8	23,7	28,1	19,9
2ЭС6	3,9	9,6	12,3	7,1
других серий электровозов				
2ЭС10	4,4	11,4	14,0	8,3
Э5К	5,0	8,2	17,0	7,8
2ЭС5К	4,3	10,2	13,9	7,8
2ЭС4К	3,3	9,1	13,8	6,9
2ЭС5	4,3	9,2	13,3	7,3
2ЭС7	4,5	10,7	13,5	8,0
ЭП20 (пер.)	18,4	28,0	31,4	23,7
ЭП20 (пост.)	19,0	29,1	32,6	24,6

На основании изложенного можно сделать заключение о том, что если в качестве критерия эффективности использования электроэнергии электровозами принять индикаторы их энергоэффективности, то приведенные в статье подходы позволят в перспективе разработать автоматизированную систему оценки, которая обеспечит объективное сравнение различных серий электровозов для эксплуатации на конкретных участках железных дорог с учетом их технических характеристик, что в свою очередь позволит оптимизировать использование тяговых ресурсов на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст]. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. – № 2537р. – 76 с.
2. Никифоров, М. М. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, А. А. Комяков // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 159 – 165.
3. Никифоров, М. М. Нормативно-правовое обеспечение деятельности по энергосбережению в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] // М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 4 (24). – С. 68 – 75.

4. Приказ «Об утверждении форм отчетов о фактическом исполнении требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности в сфере железнодорожных перевозок [Текст]: ОАО «Российские железные дороги», ОАО АК «Железные дороги Якутии», ОАО «Федеральная пассажирская компания» от 25 ноября 2011 года № 745-т / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 12 с.

5. Давыдов, А. И. Общие принципы сравнительного анализа эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по участкам железных дорог [Текст] // А. И. Давыдов, М. М. Никифоров // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование – транспорту» / Самарский гос. ун-т путей сообщения, – Самара, 2013. – С. 237 – 240.

6. Давыдов, А. И. Алгоритм анализа данных об использовании энергоресурсов на тягу поездов на уровне локомотивных депо при проведении энергообследования ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / А. И. Давыдов, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 4 (55). – С. 10 – 14.

7. ГОСТ Р 54195-2010. Ресурсосбережение. Промышленное производство. Руководство по определению показателей (индикаторов) энергоэффективности [Текст] / – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.

8. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 26 декабря 2014 г. № 519 [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2014. – 22 с.

9. Методика подтверждения индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 26 декабря 2014 г. № 518 [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2014. – 13 с.

10. Никифоров, М. М. Применение расчетно-аналитического метода для сравнительной оценки энергоэффективности грузовых электровозов [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы второй всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 143 – 149.

11. Обеспечение контроля энергоэффективности электровозов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. М. Никифоров и др. // Железнодорожный транспорт / МИИТ. – М. – 2015. – № 3. – С. 60 – 65.

12. Вильгельм, А. С. Методика подтверждения расчетных значений индикатора энергоэффективности электровозов с коллекторными тяговыми двигателями [Текст] / А. С. Вильгельм, А. А. Запрудский, М. М. Никифоров // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 273 – 279.

13. Никифоров, М. М. Особенности определения индикаторов энергоэффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 138 – 145.

14. Никифоров, М. М. Результаты определения индикаторов энергоэффективности электровозов новых серий [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, О. О. Комякова // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы: Труды всерос. науч.-практ. конф. Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2015. – С. 89 – 94.

15. Никифоров, М. М. Определение индикатора энергоэффективности электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 147 – 154.

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

References

1. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznyye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda* (The energy strategy of «Russian Railways» holding for the period until 2020 and for the future until 2030). Moscow, Approved by the decree of JSC Russian Railways on December 14, 2016, no. 2537p, 76 p.

2. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Komyakov A. A. Updating of the energy strategy by holding «Russian railways» for the period until 2020 and up to 2030 [O rabote po aktualizatsii energeticheskoy strategii kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda]. *Materialy vtoroy mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Povysheniye energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem»* (Materials of second international scientific-practical. conf. «Increase of land transport systems energy efficiency»). Omsk, 2016. pp. 159 – 165.

3. Nikiforov M. M., Nezevak V. L. Standard legal support activities for energy saving in holding «Russian railways» [Normativno-pravovoye obespecheniye deyatel'nosti po energosberezheniyu v kholdinge «Rossiyskiye zheleznyye dorogi»]. *Izvestiya Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 (24). pp. 68 – 75.

4. *The order «On approval of the forms of reports on the actual implementation of requirements for programs in the field of energy conservation and improving the energy efficiency of organizations that carry out regulated activities in the sphere of rail transportation.* (Ob utverzhdenii form otchetov o fakticheskom ispolnenii trebovanij k pro-grammam v oblasti ehnergosberezheniya i povysheniya ehnergeticheskoy ehffektivnosti organi-zacij, osushchestvlyayushchih reguliruemye vidy deyatel'nosti v sfere zheleznodorozhnyh pere-vozok). JSC «Russian Railways», JSC AK «Railways of Yakutia», JSC «Federal Passenger Company» From November 25, 2011 N 745-t.

5. Davydov A. I., Nikiforov M. M. General principles of comparative analysis of electric energy use efficiency for traction of trains on sections of railways [Obshchiye printsipy sravnitel'nogo analiza effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na tyagu poyezdov po uchastkam zheleznykh dorog]. *Materialy VI Mezhdun. nauch.-prakt. konf. «Nauka i obrazovaniye transportu»* (Materials of sixth international scientific-practical. conf. «Science and education to transport»). – Samara, 2013. pp. 237 – 240.

6. Davydov A. I., Nikiforov M. M. Algorithm for the analysis of data on the use of energy resources for train traction at the level of locomotive depots during the energy survey of JSC Russian Railways [Algoritm analiza dannykh ob ispol'zovanii energoresursov na tyagu poyezdov na urovne lokomotivnykh depo pri provedenii energoobsledovaniya OAO «Rossiyskiye zheleznyye dorogi»]. *Transport Urala – Transport of Urals*, 2017. no. 4(55), pp. 10 – 14.

7. *Resursosberezhenie. Promyshlennoe proizvodstvo. Rukovodstvo po opredeleniyu pokazatelej (indikatorov) ehnergoehffektivnosti, GOST R 54195-2010* (Resources saving. Industrial production. Guidance on regarding the indices (indicators) of energy efficiency). Moscow, Standary. 2011, 12 p

8. *Metodika rascheta indikatora ehnergoehffektivnosti ehlektrovoza. Utverzhdena starshim vice-prezidentom OAO «RZHD» 26 dekabrya 2014 g. №519* (Methodology for calculating the indicator of the energy efficiency of an electric locomotive. Approved by the senior vice-president of JSC Russian Railways on December 26, 2014 no. 519), Moscow, Standary. 2014, 22 p

9. *Metodika podtverzhdeniya indikatora ehnergoehffektivnosti ehlektrovoza. Utverzhdena starshim vice-prezidentom OAO «RZHD» 26 dekabrya 2014 g. №518* (Method for confirming the indicator of the energy efficiency of an electric locomotive. Approved by senior vice-president of JSC Russian Railways on December 26, 2014 № 518), Moscow, Standary. 2014, 13 p

10. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Application of the settlement and analytical method for comparison purposes energy efficiency cargo electric locomotives [Primenenie raschetno-analiticheskogo metoda dlya sravnitelnoj ocenki ehnergoehffektivnosti gruzovyh ehlektrovozov].

Materialy II vserossiyskoy konferencii «Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov» (Proceedings of the II All-Russian conference «Operational reliability of the locomotive park and increase of traction traction efficiency»). – Omsk, OSTU, 2014. pp. 143 – 149.

11. Shantarenko S. G., Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Ensuring control of energy efficiency of electric locomotives [Obespecheniye kontrolya energoeffektivnosti elektrovozov]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2015. no. 3. pp. 60 – 65.

12. Vilgelm A. S., Zaprudskiy A. A., Nikiforov M. M. Method of confirmation calculated values of the energy efficiency indicator for electric locomotives with collector traction engines [Metodika podtverzhdeniya raschetnykh znacheniy indikatora energoeffektivnosti elektrovozov s kollektornymi tyagovymi dvigatelyami]. *Materialy mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Povysheniye energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh system»* (Materials of international scientific-practical. conf. «Increase of land transport systems energy efficiency»). – Omsk, 2014. pp. 273 – 279.

13. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Features of electric locomotives energy efficiency indicators definition with the asynchronous traction drive [Osobennosti opredeleniya indikatorov energoeffektivnosti elektrovozov s asinkhronnym tyagovym privodom]. *Materialy vserossiyskoy nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem «Tekhnologicheskoye obespecheniye remonta i povysheniye dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Materials of All-Russian scientific-technical. conf. with international participation «Technological maintenance of repair and increase of dynamic qualities of a railway rolling stock»). – Omsk, 2015. pp. 138 – 145.

14. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Komyakova O. O. Results of energy efficiency indicators definition for new series electric locomotives [Rezultaty opredeleniya indikatorov energoeffektivnosti elektrovozov novykh seriy]. *Trudy Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. « Nauka, tvorchestvo i obrazovaniye v oblasti elektroenergetiki i elektrotekhniki – dostizheniya i perspektivy»* (Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Conf. «Science, creative ty and education in the field of electric power engineering and electrical engineering - achievements and prospects»). – Omsk, 2015. pp. 89 – 94.

15. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Definition of the energy efficiency indicator of direct and alternating current electric locomotives [Opredeleniye indikatora energoeffektivnosti elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka]. *Materials of scientific conf. «Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of scientific. conf. «Innovative projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2015. pp. 147 – 154.

16. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Rules of traction calculations for train work). Moscow: Transport, 1985. 287 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st. Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, chief of reseach-and-production laboratory of «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Vilgelm Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st. Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up tech-

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», доцент», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Сергеев Роман Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, декан электромеханического факультета, доцент», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-06-57.

E-mail: sergeevrv@omgups.ru

nologies and electromagnetic compatibility», Assistant Professor, OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

Sergeev Roman Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st. Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, dean of electromechanical faculty Assistant Professor, OSTU.

Phone: (3812) 31-06-57.

E-mail: sergeevrv@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Применение индикаторов энергетической эффективности электровозов для оптимизации использования тяговых ресурсов [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, Р. В. Сергеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 88 – 98.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M. M., Vilgelm A. S. Sergeev R. V. Application of power efficiency indicators of electric locomotives for optimization of use traction resources. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 88 – 98 (In Russian).

УДК 681.5

В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИИЖТ (ИрГУПС)), г. Чита, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки адаптивной модели управления энергетическим комплексом железнодорожного предприятия на основе продукционных правил. Представлен алгоритм управления расходом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на нетяговые нужды в структурных подразделениях железнодорожного транспорта с использованием математического аппарата нечеткой логики. Предложено использовать базу правил нечетких выводов для оценки адекватности разработанной модели управления процессом потребления ТЭР.

Ключевые слова: нечеткая логика, энергетический комплекс железнодорожного предприятия, продукционная модель управления, нечеткие выводы, база правил нечетких выводов.

Valeriya E. Osipova, Dmitrii A. Yakovlev

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU)), Chita, the Russian Federation

THE USE OF THE MATHEMATICAL APPARATUS OF A PRODUCTION MODEL-TERM MANAGEMENT OF THE ENERGY COMPLEX ENTERPRISE ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

Abstract. The article discusses the process of developing an adaptive model of energy management of the railway enterprise on the basis of production rules. An algorithm for flow control of fuel and energy resources (FER) of the enterprise of the railway industry using mathematical apparatus of fuzzy logic. Proposed to use the base rules of fuzzy conclusions to assess the adequacy of the developed model of management.

Keywords: fuzzy logic, energy sector, railway companies, performance management model, fuzzy insights, rules of the fuzzy conclusions.

Наличие неопределенностей или нечеткой информации, которая не может быть интерпретирована в вероятностных терминах, приводит к тому, что традиционные методы управления производственными процессами на основе компьютерных технологий являются недостаточно адекватными [1]. В результате этого в последнее время широко используются интеллектуальные системы управления [2], к которым относятся системы нечеткого управления, или «fuzzy control» – нечеткое (неясное, размытое) управление.

Нечеткая логика, служащая основой для реализации методов нечеткого управления, более естественно описывает характер человеческого мышления и ход его рассуждений, чем традиционные формально-логические системы.

Именно поэтому изучение и использование математических средств для представления нечеткой исходной информации позволяет строить модели, которые наиболее адекватно отражают различные аспекты ее неопределенности.

В качестве объектов исследования рассмотрены энергопотребляющие объекты в границах Забайкальской железной дороги (Заб. ж. д.) таких структурных подразделений, как Забайкальская дирекция тепловодоснабжения (Заб. ДТВ) и Забайкальская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение «Трансэнерго» – филиала ОАО «Российские железные дороги».

Особенностью объектов железнодорожного транспорта является неопределенность факторов, описывающих состояние объекта.

Необходимость работы в условиях неопределенностей затрудняет использование стандартных систем автоматики и АСУ ТП. Особенно сложным является описание областей допустимых режимов работы оборудования в таких условиях, так как задание жестких (четких) ограничений для АСУ ТП и систем автоматики приводит в настоящее время к отключению этих систем диспетчером. Поэтому возможность использования теории нечеткой логики для принятия управленческих решений, являющейся основой нечеткого управления, представляется крайне важной.

Основными параметрами, необходимыми для произведения синтеза и расчета на основе нечеткой логики, являются, во-первых, количество и форма функций принадлежности $\mu_i(u)$ лингвистических терм-множеств и, во-вторых, диапазоны изменения входных и выходных лингвистических переменных.

Для определения вида функций принадлежности разработаны различные экспертные методы. В ряде случаев используют стандартные формы функций принадлежности, тогда методом экспертных оценок определяется тип функций принадлежности и их параметры.

Реализация нелинейного управления возможна, если разделить все пространство состояний на ограниченные области, в которых управление осуществляется по линейным законам, а переключение между ними осуществляется с помощью лингвистических правил, определяющих характер изменения входных переменных [3].

На основе теории нечетких множеств и нечеткой логики при помощи программного продукта MATLAB, с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox [4] создана нечеткая продукционная модель управления расходом ТЭР, при создании которой использовались априорные данные о потреблении ТЭР по Дирекции тепловодоснабжения Забайкальского края, полученные в результате измерений.

Для рассматриваемой системы создана база нечетких правил с MISO-структурой: с тремя входными (температура окружающего воздуха T_B , температура подачи воды T_{II} , качество топлива K) и одной выходной (расход топливно-энергетических ресурсов P) переменными.

Для каждой переменной известны минимальные и максимальные значения:

$$\left\{ P \Leftrightarrow \begin{bmatrix} P_{\min} & P_{\max} \\ 7 & 23 \end{bmatrix} \right\} = f \left\{ \begin{bmatrix} T_{\min}^B & T_{\max}^B \\ T_{\max}^{II} & T_{\min}^{II} \\ K_H & K_B \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -38 & -7 \\ 70 & 52 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \right\}.$$

Разобьем области определений этих переменных на отрезки при условии, что число отрезков для каждой входной переменной равно трем, а для выходной – пять. На каждом из

отрезков задана одна функция принадлежности треугольной формы с вершиной в центре отрезка. Результат проведенного разбиения представлен на рисунке 1.

Функция принадлежности подобрана таким образом, чтобы области перекрывались на уровне 0,5, обеспечивая при этом возможность аналитического представления нечеткого множества в виде некоторой простой математической функции [5].

Для каждой входной переменной определены нечеткие множества с лингвистическими значениями (μ_1 – минимальное, μ_2 – среднее, μ_3 – максимальное), для выходной (μ_1 , μ_{12} – между минимальным и средним, μ_2 , μ_{23} – между максимальным и средним, μ_3).

Алгоритм разработки такой модели управления расходом ТЭР представлен на рисунке 2. Процесс разработки продукционной модели управления на основе нечеткой логики включает в себя три основных стадии обработки информации [1, 6]: фаззификацию, композицию и дефаззификацию.

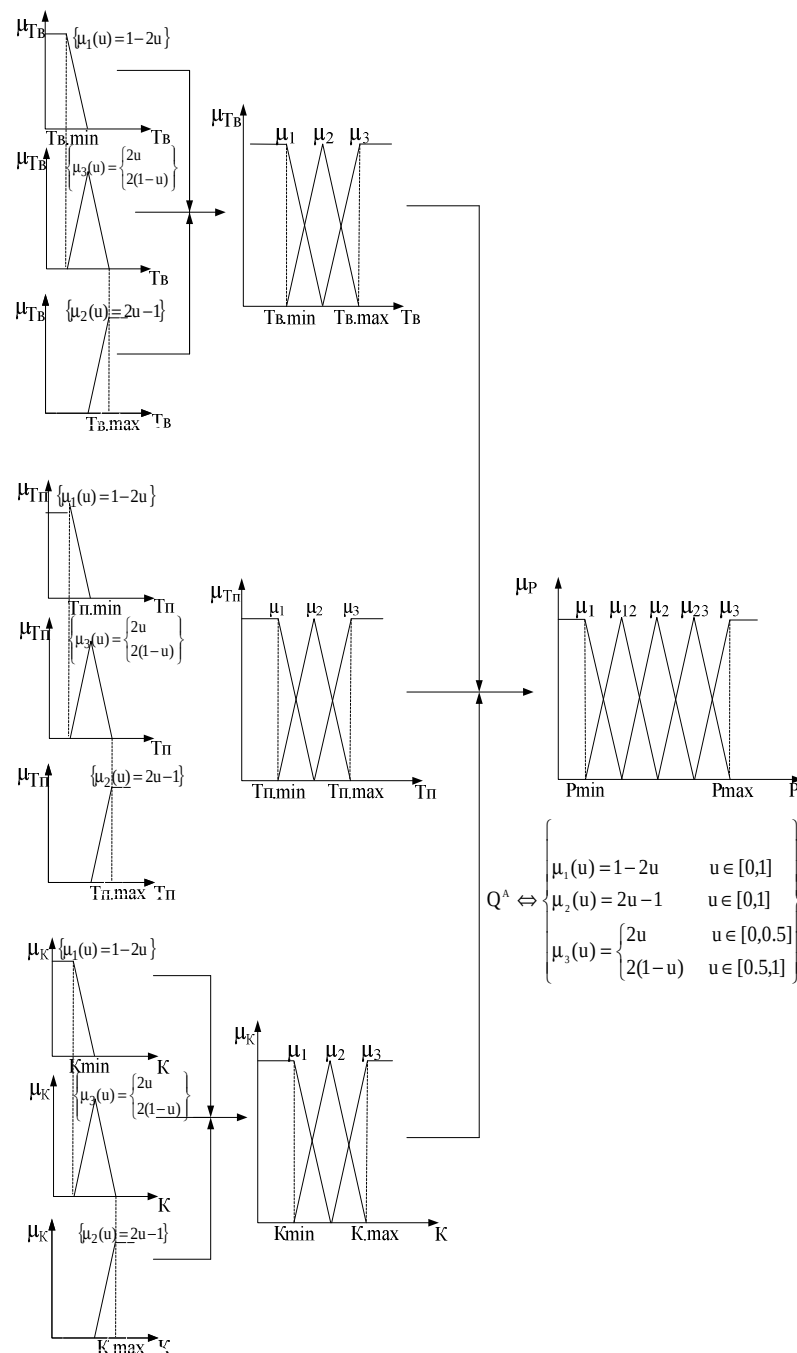


Рисунок 1 – Разделение пространств входных переменных T_v , T_p , K и выходной переменной P

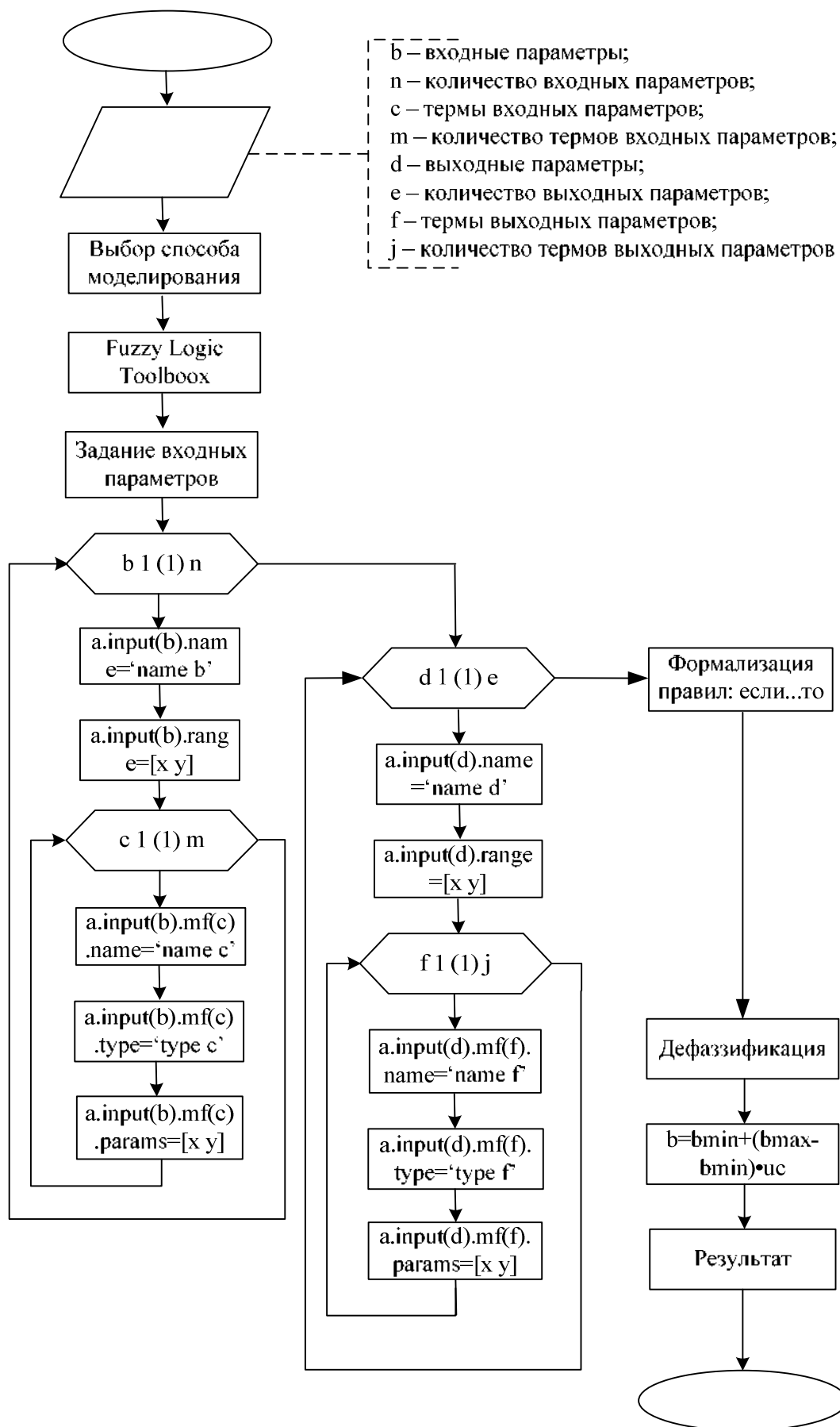


Рисунок 2 – Алгоритм разработки продукционной модели управления расходом ТЭР на предприятии

В процессе фаззификации происходит установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. Структурная схема процесса фаззификации представлена на рисунке 3.

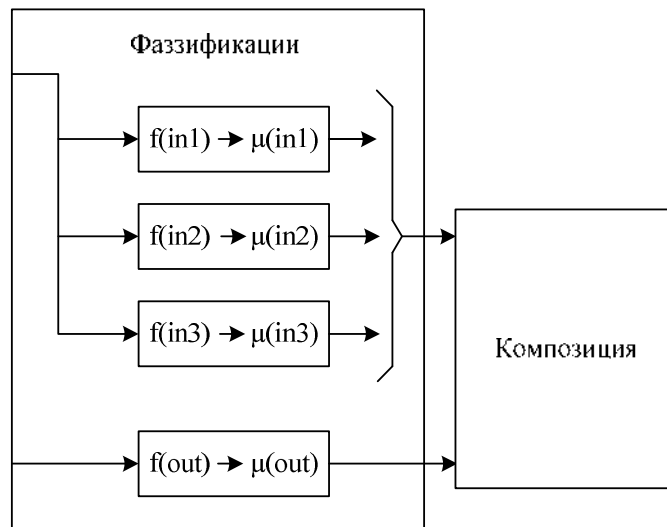


Рисунок 3 – Структурная схема обработки информации в процесса фаззификации

Композиция представляет собой процесс логической обработки нечеткой информации. Структурная схема процесса представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Структурная схема обработки информации в процессе композиции

Согласно представленной схеме процесс можно разбить на три этапа.

Формирование базы правил нечетких выводов.

Формирование начальной базы правил основано на генерации множества правил исходя из возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и заключениях правил. В соответствии с этим максимальное количество правил в базе определяется соотношением:

$$l = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot l_y,$$

где l_1, l_2, l_3 – число функций принадлежности для задания входных переменных T_v, T_n, K ; l_y – для выходной переменной P .

Таким образом, изначально сформированная база правил будет состоять из 135 правил. Такая база правил является избыточной и содержит противоречащие друг другу правила – с одинаковыми предпосылками и разными заключениями [8]. В связи с этим изначально базу правил оптимизируем, основываясь на эмпирических гипотезах, анализируя априорные данные о потреблении ТЭР по Заб. ДТВ, полученные в результате измерений, а также результаты по потреблению топлива в различные моменты времени.

В результате оптимизации были определены основные правила, имеющие следующий вид:

$$(R_i)_{i=1}^9 = \begin{cases} R_1: \text{если } T^B = T_{\min}^B \text{ и } T^H = T_{\max}^H \text{ и } K = K_{\min}, \\ \quad \text{то } P = P_{\max}; \\ R_2: \text{если } T^B = T_{sr}^B \text{ и } T^H = T_{sr}^H \text{ и } K = K_{sr}, \\ \quad \text{то } P = P_{sr}; \\ \dots\dots\dots \\ R_9: \text{если } T^B = T_{\max}^B \text{ и } T^H = T_{\min}^H \text{ и } K = K_{\max}, \\ \quad \text{то } P = P_{\min}. \end{cases}$$

Изменение параметров системы представляется следующим образом:

$$P = \begin{cases} T^B \in \begin{bmatrix} T_{\min}^B \rightarrow T_{\max}^B \\ T_{\min}^B \leftarrow T_{\max}^B \end{bmatrix}; \\ T^{\Pi} \in \begin{bmatrix} T_{\max}^{\Pi} \rightarrow T_{\min}^{\Pi} \\ T_{\max}^{\Pi} \leftarrow T_{\min}^{\Pi} \end{bmatrix}; \\ K \in \begin{bmatrix} K_H \rightarrow K_B \\ K_H \leftarrow K_B \end{bmatrix}. \end{cases}$$

Анализ представленной матрицы говорит о том, что при минимальном значении температуры воздуха и наилучшем качестве топлива расход ТЭР будет минимальным и, соответственно, наоборот [7]. Формирование начальной базы нечетких выводов основывается на определении нечеткой конъюнкции, результатом которой является нечеткое высказывание с определенной степенью истинности. Структурная схема формирования начальной базы правил типа «И» представлена на рисунке 5.

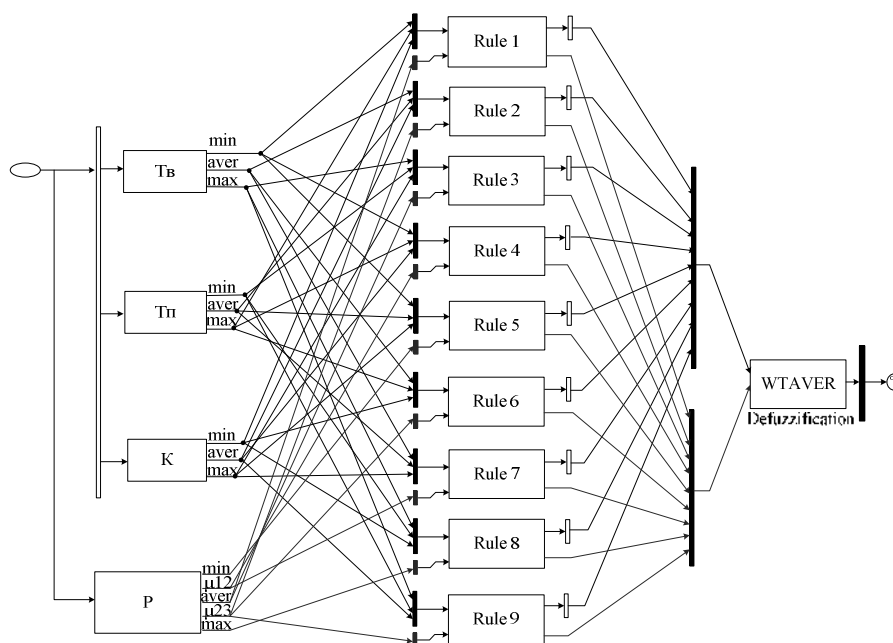


Рисунок 5 – Структурная схема блока FuzzyLogicController

Агрегирование процесс определения степени истинности условий по каждому из правил представленной системы нечеткого вывода [4]. Данный процесс сопровождается выделением из базы основных правил нечетких высказываний, основанных на результатах нечеткой дизъюнкции, в случаях когда лингвистические переменные в подусловиях попарно не равны друг другу. Процесс обработки информации на этапе агрегирования представлен на рисунке 6.

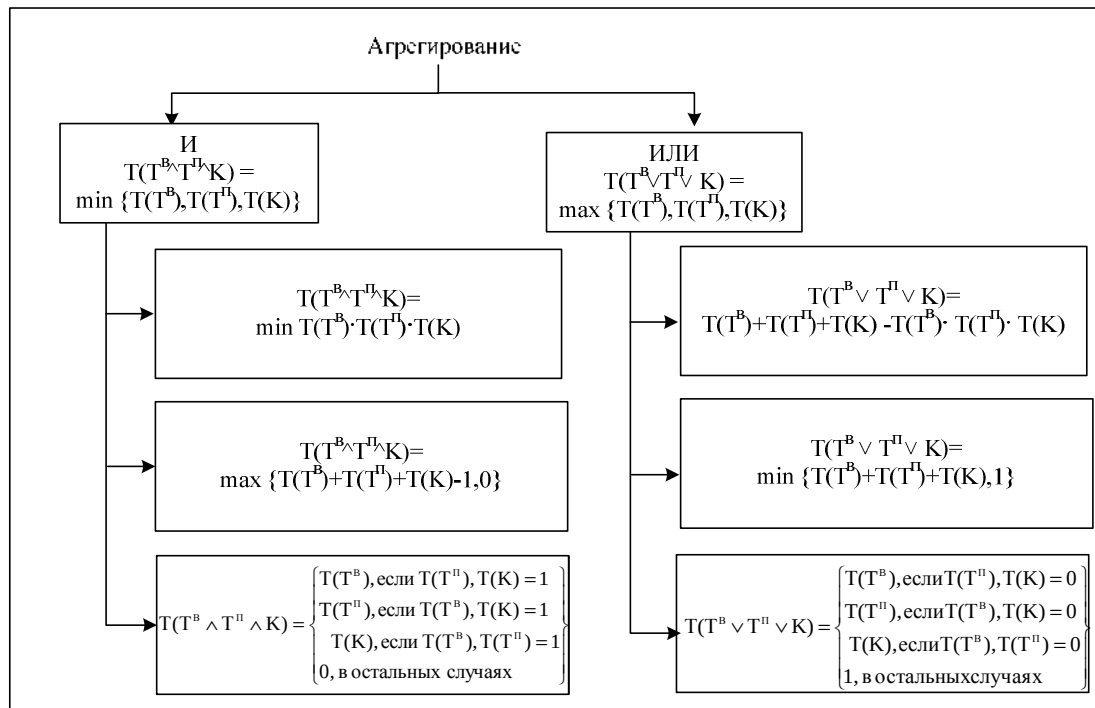


Рисунок 6 – Структурная схема обработки информации в процессе агрегирования

Активизация представляет собой процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций, в котором каждому из правил присваивается свое значение весового коэффициента, характеризующего значимость каждого из представленных правил нечеткого вывода [1,9]. Процесс обработки информации на этапе активизации представлен на рисунке 7.

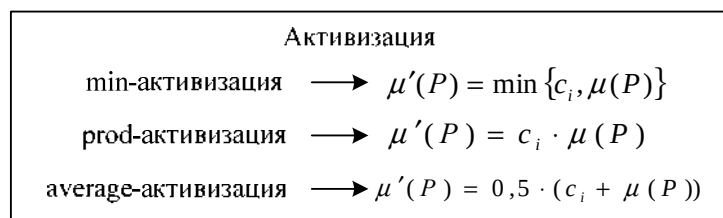


Рисунок 7 – Структурная схема обработки информации в процессе активизации

Процесс дефаззификации заключается в преобразовании нечетких значений найденных выходных переменных в четкие, способы достижения которого зависят от выбранного метода исследования. Структурная схема обработки информации в процессе дефаззификации представлена на рисунке 8, реализация рассматриваемого процесса в FuzzyLogicToolbox на рисунке 9.

Согласно рисунку 8 процесс дефазификации в данном случае включает в себя этап аккумуляции в системах нечеткого вывода, представляющий собой процесс нахождения функции принадлежности выходной лингвистической переменной (расхода ТЭР).

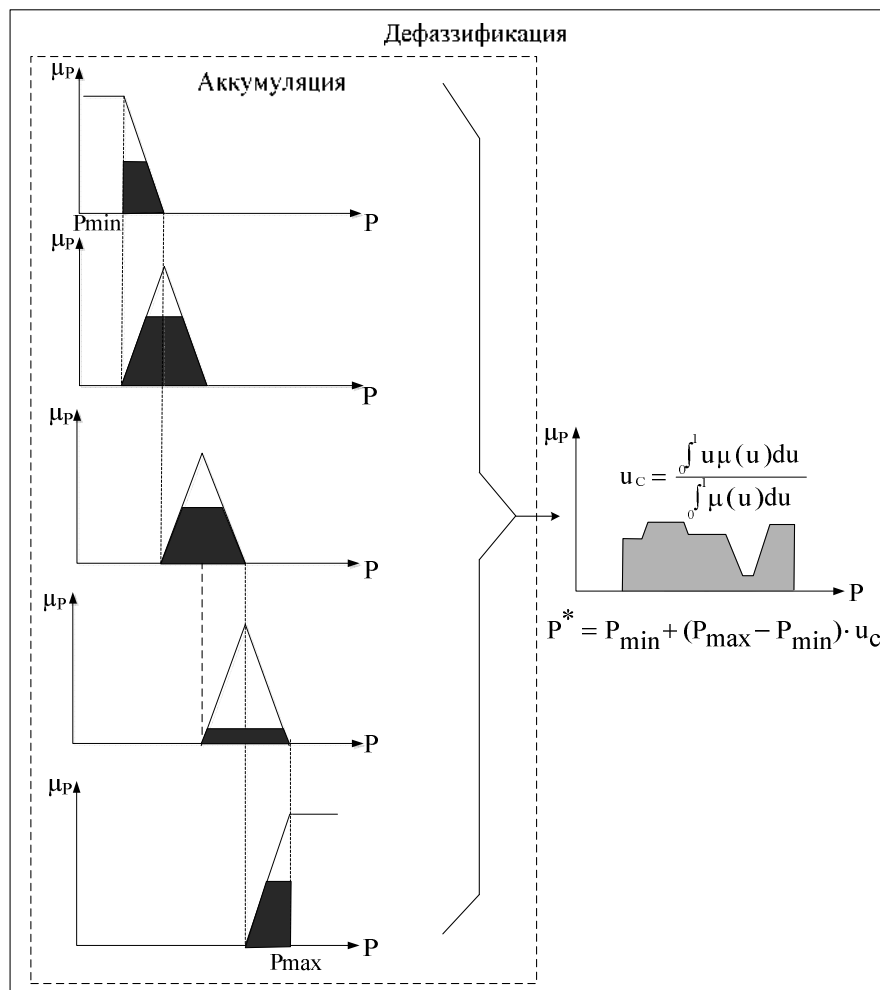


Рисунок 8 – Структурная схема обработки информации в процессе дефазификации

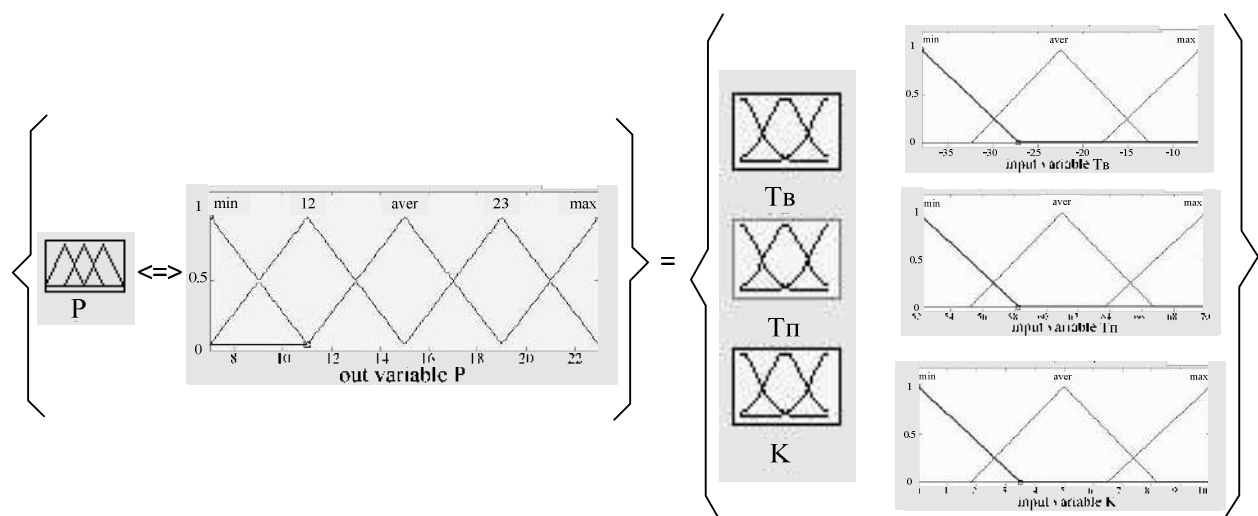


Рисунок 9 – Функции принадлежности входных и выходной переменных рассматриваемой системы

В процессе аккумуляции происходит объединение всех степеней истинности заключений (подзаключений) для получения функции принадлежности выходной переменной Р (рисунок 10, б).

Сам же процесс дефаззификации заключается в приведении выходной лингвистической переменной, полученной на этапе аккумуляции, в обычное количественное значение расхода ТЭР на рассматриваемом участке. Для алгоритма Мамдани в данном случае численный расчет на этапе дефаззификации выполнялся по методу центра тяжести (рисунок 10, а).

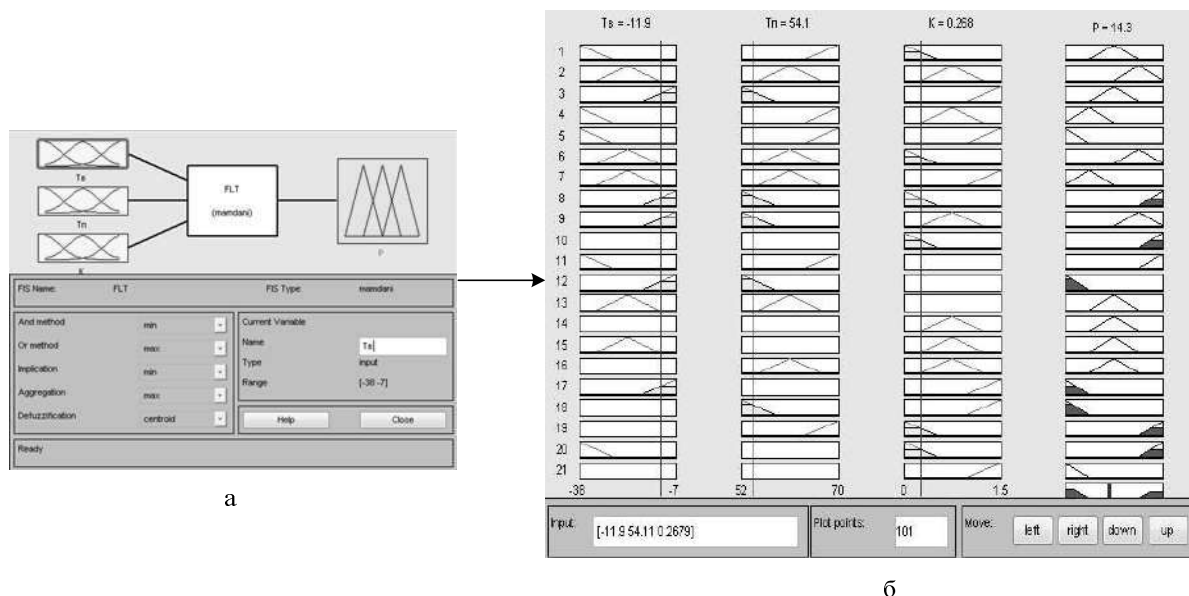


Рисунок 10 – Процесс работы системы нечеткого управления расходом ТЭР, реализованный в Fuzzy Logic Toolbox

Для анализа разработанной нечеткой модели управления воспользуемся программой просмотра поверхности нечеткого вывода, представленной на рисунке 11, отображающей функциональную зависимость выходной лингвистической переменной (расхода ТЭР) от двух входных лингвистических переменных (температуры воздуха и качества топлива) в форме изменения оттенка, насыщенности цвета и непосредственно формы поверхности.

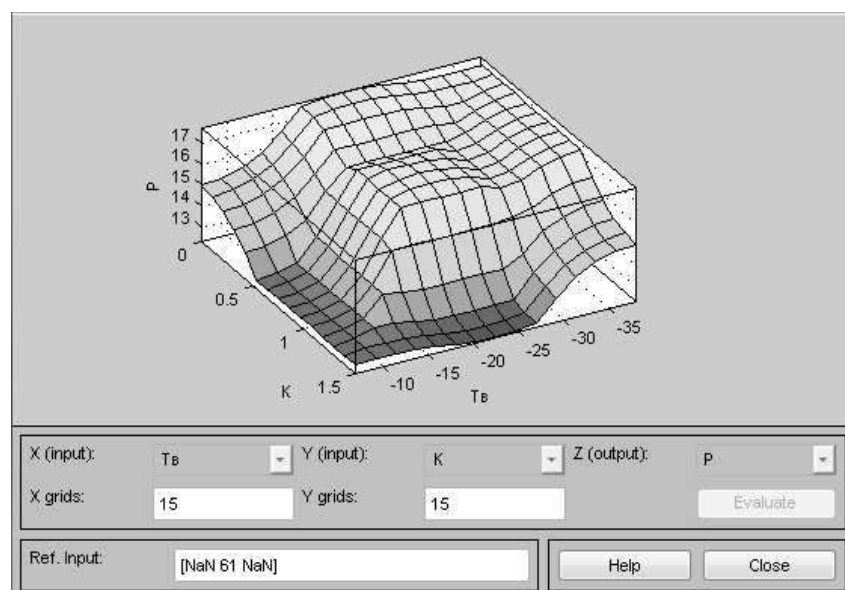


Рисунок 11 – Поверхность нечеткого вывода разработанной модели управления

Отсутствие разрывов и скачкообразных изменений на поверхности нечеткого вывода свидетельствует об устойчивом характере данных разработанной нечеткой модели, что является одним из веских аргументов в пользу применения этой модели в практике принятия решений о величине расхода ТЭР.

Эффективность функционирования разработанной модели управления оценена на показателях работы структурных подразделений ОАО «РЖД», таких как Забайкальская дирекция тепловодоснабжения и Забайкальская дирекция по энергообеспечению. Анализ полученных результатов показал, что погрешность расчетных значений лежит в интервале 2 – 3 %, что свидетельствует о высокой эффективности предлагаемой модели управления топливно-энергетическим комплексом железнодорожного предприятия.

Разработанная модель проста в управлении и допускает без особых усилий определить значение расхода ТЭР на рассматриваемом участке в зависимости от различных внешних условий. Наглядность и упрощение процесса программной разработки позволяет оценить результаты и при необходимости внести корректирующие действия.

Список литературы

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] / Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
2. Алиев, Р. А. Нечеткие алгоритмы и системы управления [Текст] / Р. А. Алиев, С. В. Ульянов. – М.: Знание, 1990. – 135 с.
3. Борисов, В. В. Нечеткие модели сети [Текст] / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
4. Рудковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рудковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский / Перевод с польского И. Д. Рудинского – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
5. Комяков А. А. Анализ влияния типа и количества функций принадлежности нечеткой нейронной сети на точность моделирования процесса электропотребления [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, Д. О. Силуянов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. Ч. 3. – С. 153 – 158.
6. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
7. Система анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров и др. // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2007. – С 15 – 24.
8. Komyakov, A. A. Construction of electricity consumption mathematical models on railway transport used artificial neural network and fuzzy neural network / M. M. Nikiforov, V. V. Erbes and other / IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering Florence, 2016, pp. 1 – 4.
9. Осипова, В. Э. Применение системы нечеткого управления энергообеспечением предприятия [Текст] / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев, В. Г. Дурнов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование: Сб. науч. ст. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения, Иркутск, 2011. – С. 147 – 152.

References

1. Pospelov D. A. *Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* (Fuzzy sets in management models and artificial intelligence). Moscow: Nauka, 1986, 312 p.
2. Aliev R. A., Ulyanov S. V. *Nechetkiye algoritmy i sistemy upravleniya* (Fuzzy algorithms and control systems). Moscow: Knowledge, 1990. 135 p.

3. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkiye modeli seti* (Fuzzy network model). Moscow: Hot line – Telecom, 2007. 284 p.
4. D. Rudkovskaya, Pilinsky M., Rutkovsky L. Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems): translation from Polish I.D. Rudinsky / D. Rudkovskaya, M. Piliński, L. Rutkovsky - M.: Hot line - Telecom, 2006. - 452 p.
5. Komyakov A. A., Erbes V. V., Siluyanov D. O. Analysis of the influence of the type and number of membership functions of the fuzzy neural network on the accuracy of the electric load simulation [Analiz vliyaniya tipa i kolichestva funktsiy prinalozhnosti nechetkoj nejronnoj seti na tochnost modelirovaniya processa ehlektropotrebleniya]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava materialy tretej vse-rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v trekh chastyakh. Chast 3* (Proceedings of the conference «Technological maintenance of repair and increase of dynamic qualities of a railway rolling stock». Part 3). Omsk, 2015, pp. 153 – 158.
6. Leonenko A. V. *Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH). St. Petersburg: BHV – Petersburg, 2003. 736 p.
7. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Pashkov D. V., Komyakov A. A., Kovalev Yu. Z. The system for analyzing and planning the consumption of electric energy for not traction needs JSC Russian Railways [Sistema analiza i planirovaniya raskhoda ehlektricheskoy ehnergii na netyagovyye nuzhdy v OAO «RZHD»]. *Innovacionnyye proekty i novye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: sb. nauch. st.* (Innovative projects and new technologies in railway transport: the collection of scientific articles). Omsk, 2007, pp. 15 – 24.
8. Komyakov A. A., Nikiforov, M. M., Erbes, V. V., Cheremisin V. T. and Ivanchenko V. I., «Construction of electricity consumption mathematical models on railway transport used artificial neural network and fuzzy neural network», 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1 – 4. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555450.
9. Osipova V. Ye., Yakovlev D. A., Durnov V. G. *Primeneniye sistemy nechetkogo upravleniya energoobespecheniyem predpriyatiya* (Application of the system of fuzzy control of power supply of the enterprise) / «Modern technology. System analysis. Modeling», Part 3, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 2011. pp. 147 – 152.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипова Валерия Эдуардовна

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИИЖТ (ИрГУПС)).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», ЗабИИЖТ.

Тел.: +7924-371-55-94.

E-mail: Valeri3307@mail.ru

Яковлев Дмитрий Александрович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИИЖТ (ИрГУПС)).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИИЖТ.

Тел.: +7914-502-82-80.

E-mail: d5028280@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Osipova Valeriya Eduardovna

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU)).

Magistral'naya street., Chita, 672040, Russia.

Chief lecturer of the chair «Power supply», ZiRT.

Phone: +7924-371-55-94.

E-mail: Valeri3307@mail.ru

Yakovlev Dmitrii Aleksandrovich

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU)).

Magistral'naya street., Chita, 672040, Russia.

Cn.Sci.Tech., docent of the chair «Power supply», ZiRT.

Phone: +7914-502-82-80.

E-mail: d5028280@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осипова, В. Э. Применение математического аппарата производственной модели управления энергетическим комплексом предприятия на основе нечеткой логики [Текст] / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 98 – 109.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Osipova V. E. The use of the mathematical apparatus of a production model-term management of the energy complex enterprise on the basis of fuzzy logic / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev // Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 98 – 109 (In Russian).

УДК 629.4.016.01

В. Ф. Тарута, А. В. Чулков, Л. В. Милютин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы анализа режимов работы маневровых тепловозов и особенностей настройки характеристик тяговых генераторов при проведении реостатных испытаний тепловозов. Приведены статистические средние значения параметров нагрузки дизель-генераторных установок маневровых тепловозов ТЭМ2 в процессе выполнения маневровой работы на сортировочных и участковых станциях. При контроле внешней характеристики тепловоза при проведении реостатных испытаний с использованием АСКИ «Кипарис» наблюдались внешние характеристики нормальной («классической») и «выпуклой» форм. Нормальная («классическая») внешняя характеристика тепловоза ТЭМ2 № 1 эквидистантно удалена от границ поля допуска; а «выпуклая» внешняя характеристика тепловоза ТЭМ2 № 2, находясь в поле допуска, не поддерживает постоянства мощности дизель-генераторной установки, что обусловлено несовершенством машинной системы регулирования, в частности, электромеханическими характеристиками возбудителя.

Ключевые слова: маневровый тепловоз, эксплуатация, дизель-генераторная установка, внешняя характеристика, контроль, настройка, уровень мощности.

Viktor F. Taruta, Alexey V. Chulkov, Larisa V. Milyutina

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

TECHNOLOGY OF CONTROL OF POWER LEVEL FOR CONTROL DIESEL-GENERATOR INSTALLATION OF THE SHUNTING LOCOMOTIVE TAKING INTO ACCOUNT SERVICE CONDITIONS

Abstract. The article deals with the analysis of the modes of operation of shunting locomotives; characteristics of the setting characteristics of the traction generators when performing resistance tests of locomotives. The statistical average values of the load parameters of diesel generator sets of shunting locomotives ТЭМ2 in the process of performing shunting work on marshalling and precinct stations. When monitoring the external characteristics of the locomotive when performing resistance tests with the ASKI "CYPRESS" was observed of the external characteristics of a normal ("classical") and "convex" shape. Normal (classical) external characteristics of the locomotive ТЭМ2 No. 1 equidistant removed from the borders of the tolerance field; and "convex" external characteristics of the locomotive ТЭМ2 No. 2, in the field of tolerance, support of the constancy of the power diesel generator sets, due to the imperfection of the machinery of the regulatory system, particularly the Electromechanical characteristics of the pathogen.

Keywords: locomotive, diesel-generator installation, power level, control, control, external characteristic, operation.

Многолетние наблюдения за расходом топлива маневровыми тепловозами показывают, что паспортный расход топлива дизелей разных типов не всегда соответствует фактическому расходу топлива в реальных условиях эксплуатации. При работе тепловозов в одном и том же маневровом районе с одинаковой нагрузкой дизели с лучшими паспортными характеристиками

тиками могут расходовать топлива существенно больше, чем дизели, паспортные характеристики которых не совпадают с рекомендованными Руководствами на проведение реостатных испытаний при техническом обслуживании (ТО) и текущем ремонте (ТР) тепловозов [1]. Данный вывод подтверждается и исследованиями, проведенными сотрудниками кафедры «Локомотивы» ОмГУПС [2].

Одной из причин, вызывающих отклонения мощности и топливной экономичности тепловозов от паспортных значений, является несоответствие условий эксплуатации условиям, при которых проведена настройка характеристик дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза. Поиски путей повышения эффективности использования маневровых тепловозов и их топливной экономичности возможны только при тщательном изучении и анализе условий эксплуатации тепловозов, режимов работы ДГУ, системы ТО и ТР в сервисных локомотивных депо.

Режимы работы маневровых тепловозов в эксплуатации отличаются большим разнообразием и зависят от множества факторов: низкие скорости движения, частые изменения массы составов, большое число переключений позиций контроллера (ПК) и реверсирования тепловоза, малые радиусы кривых, наличие множества стрелочных переводов, ограниченная видимость сигналов и ряд других. Приведенные выше факторы влияют на режимы нагрузки ДГУ и топливную экономичность тепловозов в процессе их эксплуатации.

Одним из основных факторов, влияющих на расход топлива, является рациональный режим загрузки ДГУ при выполнении маневровой работы. Для определения среднеэксплуатационного режима загрузки ДГУ при маневровой работе проводились опытные поездки на тепловозах ТЭМ2 на станциях Омского и Красноярского железнодорожных узлов.

В результате обработки экспериментальных данных получены распределения параметров нагрузки ДГУ тепловозов в условиях эксплуатации. Так, время работы ДГУ в режиме холостого хода составляет 62 – 65 % от общего времени эксплуатации, в режиме тяги при работе на 1-й – 5-й позициях контроллера машиниста – 27 – 29 %.

Результаты исследований показали, что ДГУ работают в условиях переменных нагрузок. Частые остановки маневровых тепловозов, изменение направления движения, частая смена позиций контроллера машиниста (КМ) приводят к нестабильной работе ДГУ тепловоза. По данным исследований ВНИИЖТа и ОмГУПС частота переключения позиций КМ составляет 4 – 6 раз в минуту.

Разработка аналитических методов оценки влияния приведенных факторов на мощность и экономичность ДГУ затруднена из-за неоднозначного характера их воздействия на уровень реализованной мощности в условиях реальной эксплуатации. Поэтому для определения параметров настройки характеристик ДГУ с учетом условий эксплуатации целесообразно использовать экспериментальные данные.

В таблице 1 представлены статистические средние значения параметров нагрузки ДГУ тепловозов ТЭМ2 в процессе выполнения маневровой работы на станциях [10].

Таблица 1 – Средние значения параметров нагрузки ДГУ в эксплуатации

Позиция КМ	Мощность тягового генератора (ТГ), кВт	Часовой расход топлива, кг/ч	Время работы на позиции, %
0	0	8,2 – 11,5	66,50
1	28 – 40	12,0 – 13,5	4,30
2	72 – 90	17,2 – 22,5	6,50
3	130 – 152	35,2 – 46,4	8,10
4	200 – 245	61,7 – 74,4	7,60
5	315 – 348	82,0 – 101,2	5,50
6	450 – 482	121,0 – 128,0	1,30
7	600 – 660	152,0 – 162,5	0,15
8	720 – 756	188,7 – 206,0	0,05

Анализ данных таблицы 1 показал, что в процессе эксплуатации маневровых тепловозов ТЭМ2 отклонение мощности ДГУ на одной и той же позиции достигает 20 кВт и выше, что является одной из причин повышения расхода топлива на тягу поездов [3].

Переменные режимы работы маневрового тепловоза в эксплуатации характеризуются изменением скоростей движения и нагрузки ДГУ. Ток нагрузки тягового генератора при изменении режимов его работы меняется и зависит от условий работы тяговых электродвигателей тепловоза (ТЭД). Для полного использования мощности дизеля на каждом скоростном режиме (позиции контроллера машиниста) необходимо мощность тягового генератора так же поддерживать постоянной.

Автоматическая система регулирования мощности тягового генератора (АСРГ) выполняет функцию поддержания постоянства мощности при изменении напряжения в соответствии с равенством

$$P_{\text{ТГ}} = \eta_{\text{ТГ}}(N_{\text{е}} - N_{\text{всп}}) = U_{\text{ТГ}} I_{\text{ТГ}} 10^{-3}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ТГ}}$ – КПД тягового генератора тепловоза;

$N_{\text{е}}$ – эффективная мощность дизеля, кВт;

$N_{\text{всп}}$ – мощность вспомогательных устройств тепловоза, кВт;

$U_{\text{ТГ}}$ – напряжение тягового генератора, В;

$I_{\text{ТГ}}$ – ток тягового генератора, А.

Поскольку напряжение и ток тягового генератора ограничены конструктивными возможностями электрической машины, то полная мощность дизеля может быть реализована лишь в некотором диапазоне нагрузок. На остальных участках внешней характеристики мощность дизеля будет использоваться не полностью.

Равенство (1) можно представить в виде:

$$N_{\text{е}} = (P_{\text{ТГ}} + \eta_{\text{Г}} N_{\text{всп}}) / \eta_{\text{ТГ}}, \quad (2)$$

Мощность дизеля в процессе работы тепловоза в эксплуатации может оставаться постоянной лишь при отсутствии работы вспомогательных механизмов ($N_{\text{всп}}$) и сохранении постоянной величины КПД тягового генератора ($\eta_{\text{ТГ}}$), что практически невыполнимо, так как эти величины постоянно изменяются.

Условия проверки параметров автоматической системы регулирования мощности ТГ при проведении реостатных испытаний значительно отличаются от режимов работы ДГУ тепловоза в эксплуатации:

во-первых, из параметров контроля энергетической цепи тепловоза исключаются ТЭД со своими электромеханическими характеристиками;

во-вторых, контроль параметров АСРГ тепловоза рекомендуется вести при статичных (установившихся) режимах нагружения ДГУ. Например, контроль параметров внешней характеристики $P_{\text{ТГ}} = f(I_{\text{ТГ}})$ тепловоза ТЭМ2 рекомендуется проводить на 8-й позиции контроллера машиниста, т. е. в режиме номинальной мощности ДГУ в «контрольных точках».

Несовершенна и методика контроля параметров АСРГ тепловоза ТЭМ2 при проведении реостатных испытаний (РИ). Контроль и настройку внешней характеристики ТГ согласно инструкции по проведению реостатных испытаний требуется проводить лишь после прогрева обмотки независимого возбуждения до средней эксплуатационной температуры (70 – 80 °С).

Температуру обмотки при этом рекомендуется вычислять по формуле, °С:

$$t_{\text{гор}} = ((R_{\text{гор}} / R_{\text{хол}})(235 + t_{\text{хол}})) - 235, \quad (3)$$

где $R_{\text{гор}} = U_{\text{в}} / I_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения генератора в горячем состоянии, Ом;

$U_{\text{в}}$ – напряжение возбуждения генератора, В;

I_B – ток возбуждения генератора, А;

$R_{\text{хол}}$ – сопротивление обмотки возбуждения в холодном состоянии (берется из паспорта тягового генератора), Ом;

$t_{\text{хол}}$ – температура обмотки возбуждения в холодном состоянии (берется из паспорта тягового генератора), °С.

В действительности по ряду причин достаточно трудно получить в депо информацию о паспортных значениях электромеханических характеристик возбудителя, установленного на данном тепловозе. Поэтому определением точной температуры рабочих обмоток электрических машин зачастую пренебрегают, хотя имеются убедительные свидетельства о том, что «основной причиной снижения мощности тепловоза в эксплуатации следует считать неправильный выбор режима прогрева обмоток электрических машин [4, 8].

Для упрощения расчетов ученый Н. А. Тертычко, например, предлагает с достаточной для практического применения точностью вычислять $t_{\text{гор}}$ по формуле [5], °С:

$$t_{\text{гор}} = 370R_{\text{гор}} - 235. \quad (4)$$

где $R_{\text{гор}}$ – сопротивление обмотки в горячем состоянии, Ом.

Однако более правильным следует считать нормирование температуры для прогрева рабочих обмоток электрических машин на основе оценки условий работы тепловозов на определенных участках с учетом сезонных условий предстоящей эксплуатации.

В соответствии с требованиями «Рабочей методики РИ тепловозов ТЭМ2» (п. 6.4.2.2.1) ЗАО УК БМЗ [6, 9] проверка внешней характеристики производится следующим образом:

ввиду значительного влияния петли гистерезиса на результаты замеров, замеры следует производить с увеличением от малых токов к большим токам.

Порядок настройки следующий: генератор нагружается на 8-й позиции контроллера машиниста до тока $I_T = 1500$ А, затем ток снижается до $I_T = 600$ А и начинается проверка;

внешнюю характеристику ТГ проверить по току генератора: 850, 1050, 1210, 1350, 1500 А.

при изменении тока нагрузки контролируют напряжение ТГ и возбудителя.

Полученные данные заносят в графу «контролируемое значение» и сравнивают с приведенными в таблице 2 допустимыми интервалами значений разброса мощности дизель-генераторной установки.

Таблица 2 – Форма таблицы для проверки соответствия контролируемого напряжения ТГ допустимым значениям

Ток ТГ, А	Напряжение ТГ, В		Напряжение возбудителя, В
	допустимый интервал значений	контролируемое значение	
850	820 – 900		
1050	750 – 660		
1210	690 – 575		
1350	580 – 515		

Снятая внешняя характеристика ТГ не должна выходить за пределы поля допуска, установленного заводом-изготовителем (рисунок 1).

Предлагаемая ЗАО УК БМЗ рабочая методика проверки напряжения ТГ при РИ тепловозов ТЭМ2 на попадание в допустимый интервал значений недостаточно совершенна.

Использование в сервисных локомотивных депо (СЛД) по ремонту тепловозов автоматизированных систем контроля и испытаний (АСКИ) показывает, что соблюдение указанных требований не является гарантией экономичной работы тепловоза.

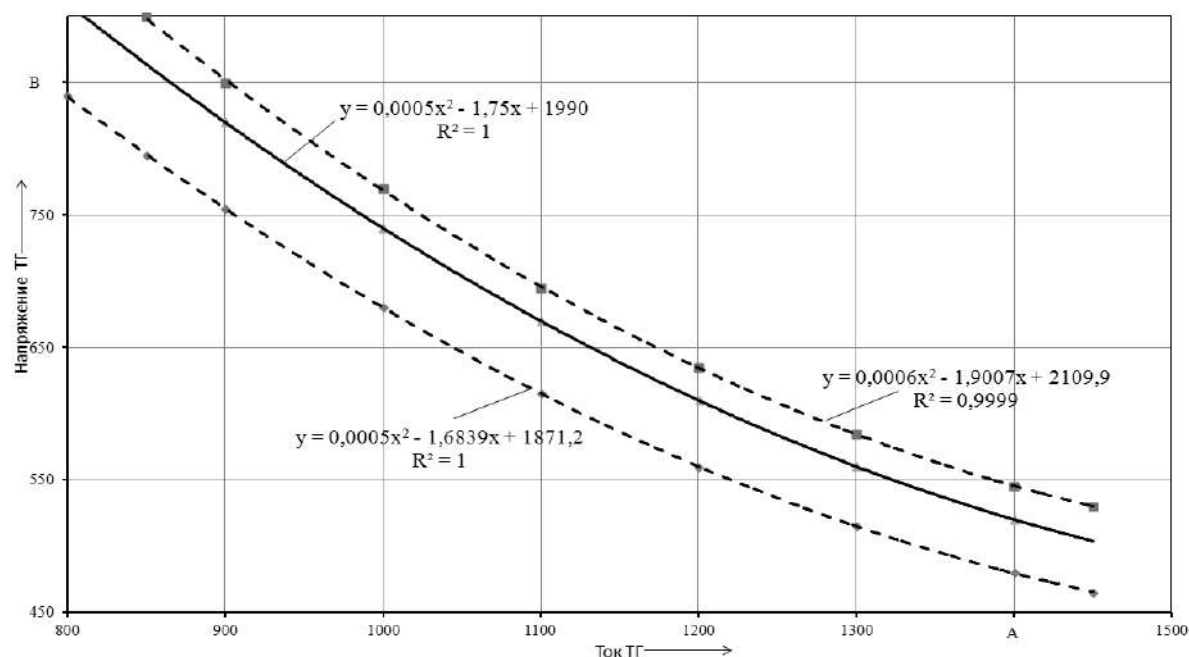
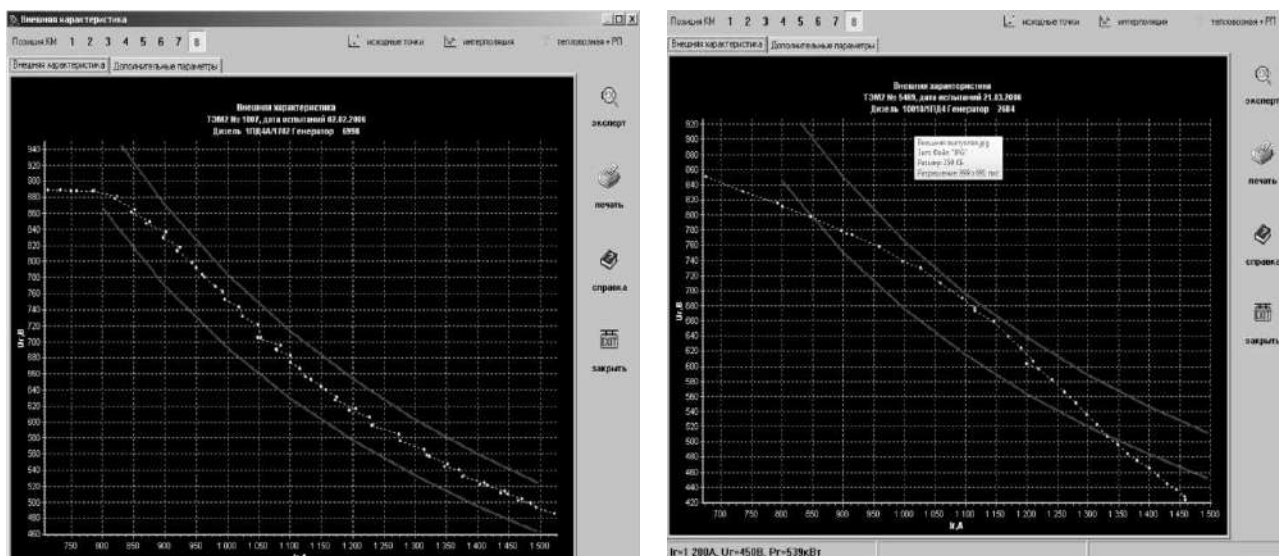


Рисунок 1 – Поле допуска и рекомендуемая внешняя характеристика ТГ

Например, на рисунке 2 представлены два фрагмента копии экрана монитора АСКИ «Кипарис» при контроле внешней характеристики тепловозов ТЭМ2 № 1 и ТЭМ2 № 2 (номера тепловозов даны условно).



а

б

Рисунок 2 – Контроль внешней характеристики тепловоза при проведении реостатных испытаний с использованием АСКИ «Кипарис»:

а – нормальная («классическая») внешняя характеристика;

б – «выпуклая» внешняя характеристика

На рисунке 2, а представлена «классическая» (нормальная) внешняя характеристика тепловоза «№ 1», эквидистантно удаленная от границ поля допуска; а на рисунке 2, б – «выпуклая» внешняя характеристика тепловоза «№ 2», обусловленная несовершенством машинной системы регулирования, в частности, электромеханическими характеристиками возбудителя [7]. При проверке напряжения тягового генератора на попадание в поле допуска для внешней характеристики оба тепловоза, казалось бы, соответствуют установленным требованиям (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты проверки соответствия контролируемого напряжения ТГ допустимым значениям

Ток ТГ, А	Напряжение ТГ, В		
	допустимый интервал значений	тепловоз № 1, контролируемое значение	тепловоз № 2, контролируемое значение
850	820 – 900	860	800
1050	750 – 660	710	715
1210	690 – 575	610	610
1350	580 – 515	545	495

Однако приведенные на рисунке 3 данные показывают, что при формальном соблюдении требований «Рабочей методики...» [6] внешние характеристики радикально отличаются друг от друга.

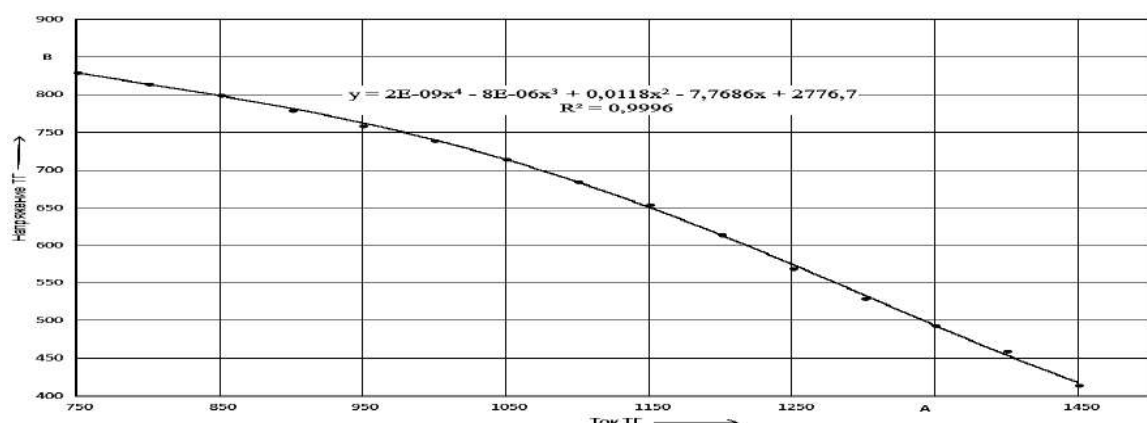
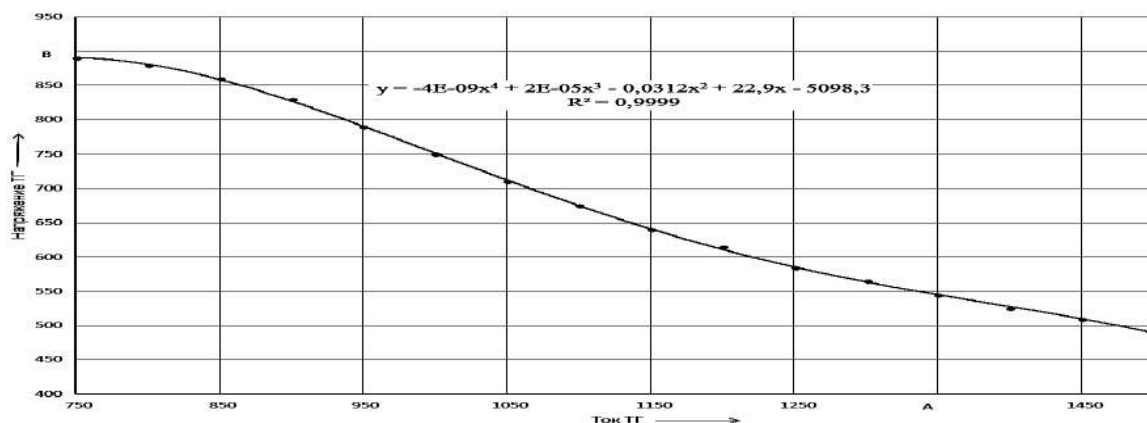


Рисунок 3 – Фрагменты анализа внешних характеристик тепловозов при проведении РИ с использованием АСКИ «Кипарис»:
а – нормальная («классическая») внешняя характеристика;
б – «выпуклая» внешняя характеристика

При этом тепловозы с «выпуклой» внешней характеристикой работают в диапазоне изменяющихся нагрузок без поддержания постоянства мощности, то перегружая ДГУ, то недогружая ее, что сопровождается перерасходом дизельного топлива из-за значительных отклонений от экономической характеристики ДГУ.

В таблице 4 представлено изменение параметров ТГ двух маневровых тепловозов ТЭМ2 с различными формами внешней характеристики.

Таблица 4 – Параметры ТГ двух маневровых тепловозов ТЭМ2 с различными формами внешней характеристики

Ток тягового генератора, А	Тепловоз ТЭМ2 с «классической» (нормальной) внешней характеристикой			Тепловоз ТЭМ2 с «выпуклой» внешней характеристикой		
	напряжение тягового генератора, В	мощность тягового генератора, кВт	отклонение мощности, %	напряжение тягового генератора, В	мощность тягового генератора, кВт	отклонение мощности, %
850	860	731	– 1,2	800	680	– 8,1
900	830	747	+ 0,9	780	702	– 5,1
950	790	751	+ 1,4	760	722	– 2,4
1000	750	750	+ 1,4	740	740	0
1050	710	746	+ 0,7	715	751	+ 1,5
1100	675	743	+ 0,3	685	754	+ 1,8
1150	640	736	– 0,5	655	753	+ 1,8
1200	615	738	– 0,3	615	738	– 0,3
1250	585	731	– 1,2	570	713	– 3,7
1300	565	735	– 0,7	530	689	– 6,9
1350	545	736	– 0,6	495	668	– 9,7

Анализ данных, приведенных в таблице 4, показал, что диапазон перерегулирования мощности ДГУ ($\Delta P_{ДГУ}$) тепловозов с «классической» внешней характеристикой составляет всего лишь 2,6 %, в то время как $\Delta P_{ДГУ}$ тепловозов с «выпуклой» внешней характеристикой – более 11,5 %. При таком колебании мощности ДГУ теряет смысл настройка на наибольшую экономичность работы тепловоза по заданным паспортным значениям экономической характеристики.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1) настройку внешней характеристики следует производить после предварительного прогрева электрических машин тепловоза. При этом температуру прогрева обмоток рассчитывать по упрощенной методике, без учета индивидуальных особенностей электрических машин данного тепловоза. Настройку параметров АСРГ вести при температуре обмоток, максимально приближенной к параметрам, определенным в реальных условиях эксплуатации данного тепловоза [4];

2) так как для каждого участка работы тепловоза ТЭМ2 существуют свои средние эксплуатационные режимы скоростей движения и нагрузок, то рекомендации по настройкам мощности АСРГ при проведении РИ необходимо определять на основании либо опыта работы машиниста, либо анализа данных, собираемых встроенными аппаратно-программными комплексами типа РПР-Т, «Борт», АСК «ВИС» и др.;

3) рекомендуется дополнить п. 6.4.2.2.1 «Рабочей методики РИ тепловозов ТЭМ2» ЗАО УК БМЗ [6] предложение «снятая внешняя характеристика ТГ не должна выходить за пределы поля допуска» словами «оставаясь эквидистантной его границам», т. е. мощность ДГУ должна поддерживаться примерно постоянной при изменении тока нагрузки в диапазонах, рекомендованных с учетом условий эксплуатации данного тепловоза.

Список литературы

1. Зозулев, А. К. Оценка и перспективы применения тепловозных дизелей ОАО «Пенздизельмаш» [Текст] / А. К. Зозулев, Л. С. Назаров // Железные дороги мира. – 1999. – № 6. – С. 87 – 90.
2. Володин, А. И. Топливная экономичность силовых установок тепловозов [Текст] / А. И. Володин, Г. А. Фофанов. – М.: Транспорт, 1979. – 224 с.
3. Тарута, В. Ф. Исследование режимов загрузки и экономичность тепловозов в условиях маневровой работы [Текст] / В. Ф. Тарута, А. В. Чулков // Исследование надежности и экономичности дизельного подвижного состава: Межвуз. Темат. Сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 1980. – С.15 – 17.
4. Парамзин, В. П. Реостатные испытания тепловозов ТЭЗ [Текст] / Парамзин В. П. – Омск: Омская правда, 1974. – 24 с.
5. Тертычко, Н. А. Проверки и регулировки при ремонте тепловозов [Текст] / Н. А. Тертычко, А. Г. Тыричев, Н. И. Тищенко / ПО МПС. – М., 1962. – 289 с.
6. Тепловозы типа ТЭМ2, ТЭМ2У, ТЭМ2УМ, ТЭМ2Р, ТЭМ2КРП, ТЭМ15, ТЭМ18, ТЭМ18Д. Приемосдаточные испытания. Рабочая методика реостатных испытаний. ТЭМ2У – Д17 / ЗАО «УК БМЗ».
7. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов [Текст] / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов / УМЦ ЖДТ. – М., 2007. – 557 с.
8. Шавердов, Ю. Ш. Испытание и регулировка дизель-генераторной установки тепловоза [Текст] / Ю. Ш. Шавердов, И. П. Кравчина. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 52 с.
9. Пособие по ускоренному поиску неисправностей в электрических цепях тепловоза серии ТЭМ2 [Текст]. – М.: Транспорт, 1996. – 46 с.
10. Анисимов, А. С. Вероятностная модель формирования режимов работы тепловозных дизель-генераторных установок в эксплуатации [Текст] / А. С. Анисимов, Е. И. Сковородников, А. В. Чулков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 4. – С. 2 – 9.

References

1. Zozuli A. K., Nazarov L. S. Evaluation and prospects of application of diesel engines of the ОАО «Penzdiesel'mash» [Ocenka i perspektivy primeneniya teplovoznnyh dizelej ОАО «Penzdizel'mash»]. *Railways of the world*. 1999. no. 6. pp. 87 – 90.
2. Volodin A. I., Fofanov G. A. *Fuel efficiency of power plants diesel* (Toplivnaya ehkonomichnost' silovyh ustanovok teplovoznov). Moscow: Transport, 1979. 224 p.
3. Taruta V. F. Study of the modes of loading and efficiency of the locomotives in the conditions of shunting [Issledovanie rezhimov zagruzki i ehkonomichnost' teplovoznov v usloviyah manevrovoj raboty]. *Investigation of the reliability and efficiency of diesel rolling stock: interuniversity thematic collection of scientific works*. – Omsk, 1980. pp. 15 – 17.
4. Paramsin V. P. *Rheostat tests of locomotives ТЭЗ* (Reostatnye ispytaniya teplovoznov TE3). Moscow: Science, 1987. 124 p.
5. Tertychka N. A., Terichev A. G., Tishchenko N. I. *Checking and adjusting repair of locomotives* (Proverki i regulirovki pri remonte teplovoznov). Moscow: IPU, 1962. 289 p.
6. *Teplovozy tipa TEHM2, TEHM2U, TEHM2UM, TEHM2R, TEHM2KRP, TEHM15, TEHM18, TEHM18D. Priyomo-sdatochnye ispytaniya. Rabochaya metodika reostatnyh ispytaniy. TEHM2U* (The locomotives of type TEM2, TEM2U, TEM2UM, TEM2R, TEM2KRP, TEM15, TEM18, TEM18D. Acceptance tests. The working methodology of resistance tests. ТЭМ2У 9). D17/ ЗАО «УК БМЗ ».

7. Dankovcev V. T., Kiselev V. I., Hetvergov V. A. *Maintenance and repair of locomotives* (Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov). Moscow: UMTS ZHDT, 2007. 557 p.

8. Shaverdov Y. S., Kravchina I. P. *Ispytanie i regulirovka dizel'-generatornoj ustanovki teplovoza* (Testing and adjustment of diesel-generator set of the locomotive). Moscow: TRANZHELDORIZDAT, 1956. 52 p.

9. *Posobie po uskorennomu poisku neispravnostej v ehlektricheskikh cepyah teplovoza serii TEHM2* (The guide for the accelerated Troubleshooting electrical circuits of the locomotive series TEM2). MPS Transport, 1996. 46 p.

10. Anisimov A. S., Skovorodnikov E. I., Chulkov A. V. A probabilistic model for the formation of modes of operation of diesel gensets in operation [Veroyatnostnaya model' formirovaniya rezhimov raboty teplovoznih dizel'-generatornyh ustanovok v ehkspluatatsii]. *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013. no. 4. pp. 2 – 9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тарута Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Соискатель научной степени, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 31-34-17.

Чулков Алексей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 31-34-17.

Милютин Лариса Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 31-34-17.

E-mail: Milutina1965@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Taruta Viktor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The competitor of scientific degree associate professor of the department «Locomotives», OmGUPS

Phone: (3812) 31-34-17.

Chulkov Alexey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

Milyutina Larisa Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Locomotives», OSTU.

E-mail: Milutina1965@mail.ru

Phone: (3812) 31-34-17.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тарута, В. Ф. Технология контроля уровня мощности для настройки дизель-генераторной установки маневрового тепловоза с учетом условий эксплуатации [Текст] / В. Ф. Тарута, А. В. Чулков, Л. В. Милютин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С. 109 – 117.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Taruta V. F., Chulkov A. V., Milyutina L. V. Technology of control of power level for control diesel-generator installation of the shunting locomotive taking into account service conditions Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 33, no 1, pp. 109 – 117 (In Russian).

Л. С. Петрова, Я. В. Крюкова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Аннотация. В статье представлена нелинейная математическая модель нагрева двухслойного тела с учетом конечной скорости распространения тепла и температурной зависимости свойств материалов. Получено численное решение нелинейной гиперболической задачи теплопроводности для случая, когда поглощение энергии излучения моделируется объемным источником тепла. Рассмотрена реализация метода сеток с использованием трехслойной неявной разностной схемы при решении нелинейной задачи теплопроводности в двухслойном теле с учетом релаксации теплового потока и условий сопряжения в случае идеального контакта на стыке слоев. Описанный алгоритм расчета температурного поля при высокоинтенсивном нагреве тела с покрытием, учитывающий зависимость теплофизических характеристик материалов от температуры, основан на реализации метода прогонки с итерационным уточнением коэффициентов. Разработаны программы и представлены результаты расчетов температурных полей с использованием нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности и соответствующих линейных с учетом среднеинтегральных значений теплофизических и оптических характеристик материалов. На основе сравнения полученных результатов обосновывается необходимость учета температурной зависимости свойств материалов при исследовании процессов высокоинтенсивного нагрева тел. Разработанная математическая модель на основе системы нелинейных гиперболических уравнений может использоваться при создании технологических процессов с применением методов обработки поверхности многослойных тел лазерным излучением.

Ключевые слова: математическая модель, задачи теплопроводности, численные методы, система нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности, метод прогонки, условия сопряжения.

Liliya S. Petrova, Yana V. Kryukova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF HIGH-INTENSITY HEATING PROCESSES OF BODIES WITH COATINGS DURING SURFACE PROCESSING BY LASER RADIATION

Abstract. The article presents a nonlinear mathematical model of heating a two-layer body with allowance of the finite velocity of heat propagation and the temperature dependence of the properties of materials. A numerical solution of the nonlinear hyperbolic heat conduction problem is obtained for the case when the absorption of the radiation energy is modeled by a volumetric heat source. The implementation of the grid method using a three-layer implicit difference scheme in solving a nonlinear heat conduction problem in a two-layer body with allowance for the relaxation of the heat flux and the conjugation conditions in the case of ideal contact at the interface junction is considered. The described algorithm for calculating the temperature field for high-intensity heating of a coated body, taking into account the dependence of the thermophysical characteristics of materials from temperature, is based on the implementation of the sweep method with iterative correction of the coefficients. Programs are developed and the results of calculating the temperature fields are presented using nonlinear hyperbolic heat conduction equations and the corresponding linear ones taking into account the average integrated thermal and optical characteristics of the materials. Based on a comparison of the results obtained the necessity of taking into account the temperature dependence of the properties of materials during the study of processes of high-intensity heating of bodies. The developed mathematical model on the basis of a system of nonlinear hyperbolic equations can be used to create technological processes using methods for processing the surface of multilayer bodies by laser radiation.

Keywords: mathematical model, heat conduction problems, numerical methods, system of nonlinear hyperbolic heat conduction equations, sweep method, conjugation conditions.

В настоящее время исследования методов обработки различных материалов с применением концентрированных потоков энергии является перспективным направлением в области создания технологических процессов по модифицированию поверхностных слоев материалов и изделий для повышения надежности и долговечности деталей, узлов систем и меха-

низмов. Среди наиболее распространенных методов обработки материалов концентрированными потоками энергии (плазменного, лазерного, электроконтактного упрочнения, комбинированной обработки) одно из основных мест занимают методы обработки лазерным излучением. В современных научных исследованиях (И. А. Исакин [3], Н. А. Смирнова, А. И. Мисюров [14], В. С. Майоров [4], П. А. Огин, К. Я. Васькин [9] и др.) отмечается практическая значимость технологического процесса поверхностной лазерной обработки ответственных узлов конструкций различного назначения, деталей машин и обрабатываемого инструмента. Исследователями выделяются следующие преимущества лазерного облучения перед другими методами обработки: локальность упрочнения, высокоскоростной нагрев и охлаждение, отсутствие механического воздействия, автоматизация процесса, обработка изделий сложных форм, технико-экономическая эффективность.

Особую актуальность проблема восстановления изношенных поверхностей и продления срока службы изделий приобретает в современных условиях для железнодорожной отрасли. В большинстве исследований для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности локомотивных и вагонных колесных пар рекомендуется использование поверхностной лазерной обработки. Исследованию и сравнению трех способов обработки металла с использованием концентрированных пучков энергии и оценке износа гребней колесных пар локомотивов посвящена работа С. Ю. Петрова, А. И. Костюкевича, А. А. Рябова [10]. В работе И. О. Шепелевой [16] описывается применение технологий лазерного и плазменного упрочнения в качестве метода повышения ресурса и снижения износа бандажей колесных пар электровозов. Работа С. И. Губенко [2] посвящена исследованию структурных изменений при лазерном воздействии на предварительно термически упрочненную колесную сталь. Исследователями А. В. Богдановым, Н. В. Грезевым, С. А. Шмелевым, М. А. Мурзаковым, Ю. В. Маркушовым [1] сравниваются технологии лазерного и плазменного упрочнения для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес и рекомендуется использование волоконного лазера. Необходимо отметить мнение авторов об эффективности лазерной обработки в железнодорожной сфере не только для решения задачи повышения прочностных характеристик в рамках трибосистемы «колесо – рельс», но и для применения лазерной термообработки в промышленных циклах ОАО «РЖД» (упрочнение надрессорных балок и боковин тележек грузовых вагонов в зоне пятниковых узлов и в зонах буксовых проемов соответственно; упрочнение фрикционных клиньев вагонов, гильз цилиндров тепловозов и др.) [1, с. 31].

Дальнейшая разработка методов использования лазерного излучения для достижения нового уровня эксплуатационных характеристик происходит в направлении развития комбинированных и гибридных технологий, в том числе нанесения защитных покрытий на поверхность и их последующей лазерной обработки. Для решения актуальной задачи модифицирования поверхностных слоев материалов с использованием концентрированных потоков энергии необходима оценка параметров процесса на основе определения температурного поля на поверхности и в объеме материала, позволяющего выбрать требуемый режим обработки поверхности. Широким диапазоном изменения температур при высокоинтенсивном нагреве тел с покрытиями обосновывается необходимость учета зависимости теплофизических характеристик от температуры и релаксации теплового потока. В этом случае математическое моделирование тепловых процессов основывается на системе нелинейных уравнений теплопроводности гиперболического типа.

Выделяются два основных подхода математического моделирования тепловых процессов при обработке лазерным излучением в зависимости от используемого метода. Математическое моделирование лазерного нагрева на основе параболического уравнения теплопроводности представлено в работах Р. В. Гришаева, Ф. Х. Мирзаде, М. Д. Хоменко, Н. А. Колесниченко, Н. В. Волгушевой, Н. Л. Бошковой, Г. В. Кузнецова, Т. А. Нагорновой и др. Решение таких задач осложняется нелинейностью граничных условий. Исследованию задач теплопроводности с учетом релаксации теплового потока и решению гиперболического уравнения теплопровод-

ности посвящены работы А. Г. Шашкова, В. А. Кудинова, И. В. Кудинова, А. Э. Кузнецова, В. Б. Веселовского, Ю. И. Широкова, А. И. Губина, Ю. А. Малой и др.

В работах большинства российских и иностранных исследователей при решении задач для нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности рассматриваются точные и приближенные аналитические методы. Наряду с использованием операционного метода или сочетания метода пространственно-временных квадрантов и операционного метода (Ю. А. Малая, А. И. Губин, А. Г. Шашаков, В. А. Бубнов, С. Ю. Яповский) реализуется методика группового анализа дифференциальных уравнений на основе построения симметрий гиперболического уравнения теплопроводности (Pakdemirli M., Şahin A. Z., Wafo Soh C.).

Учитывая, что, по мнению исследователей, выбор оптимальных технологических режимов невозможен без предварительных численных расчетов, а применение точных и приближенных аналитических методов сопряжено с резким возрастанием трудоемкости выполняемых преобразований, особенно в случае многослойных конструкций, и недостаточно представлено в отношении решения нелинейной гиперболической задачи теплопроводности, актуализируется проблема использования численных методов решения поставленных задач.

Реализация численных методов решения задач для линейного гиперболического уравнения теплопроводности представлена в исследованиях В. Ф. Очкова, А. П. Солодова [15], Л. А. Мержиевского, А. Н. Корчагиной [7], Н. И. Никитенко [8] и др. Решение нелинейной задачи теплопроводности для уравнения гиперболического типа в однослойном теле описано в работе [12]. Численное решение нелинейной задачи гиперболической теплопроводности в двухслойном теле для случая поверхностного поглощения приводится в работе [11]. Необходимо отметить, что исследований, посвященных численному моделированию процесса теплопроводности в обрабатываемом лазерным излучением двухслойном теле с учетом конечной скорости распространения тепла и температурной зависимости свойств материалов, для случая объемного поглощения нами не обнаружено.

Рассмотрим задачу о лазерном нагреве тела с покрытием при обработке концентрированными потоками энергии с учетом моделируемости поглощения энергии излучения объемным источником тепла (глубина проникновения теплоты соизмерима с толщиной слоя, в котором поглощается энергия излучения). Используем постановку задачи, решение которой с применением приближенного аналитического метода представлено в работе [6, с. 146 – 148]. Предполагая, что диаметр области нагрева намного больше глубины проникновения тепла, задача рассматривается в одномерном приближении по пространственной координате.

Плотность потока энергии излучения задается как функция времени $q_0(\tau) = q_{\max} \sin \frac{\pi \tau}{\tau_d}$ с мак-

симальным значением плотности теплового потока $q_{\max} = 0,5 \cdot 10^{13}$ Вт/м² и длительностью импульса $\tau_d = 5$ нс. Время релаксации тепловых потоков $\tau_{r,1} = \tau_{r,2} = 5 \cdot 10^{-10}$ с. На внешних границах заданы граничные условия второго рода. На стыке слоев заданы условия сопряжения с учетом идеального контакта. Температура в начальный момент времени является постоянной и равной 300 К, скорость изменения температуры в начальный момент времени принимается равной нулю. Толщина слоя покрытия и основы рассматривалась одинаковой: $L_1 = L_2 = 0,4$ мкм. Расчет температурного поля проводился для образца с материалом покрытия молибденом, теплофизические и оптические характеристики которого имеют вид [6, с. 146]:

$$\lambda_1(T) = 173,8 - 9,2 \cdot 10^{-2} \cdot T + 4,29 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 7,59 \cdot 10^{-9} \cdot T^3, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (1)$$

$$c_1(T) = 216,7 + 0,103 \cdot T - 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,01 \cdot 10^{-8} \cdot T^3, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (2)$$

$$\rho_1(T) = 1,02 \cdot 10^4 - 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot T, \text{ кг/м}^3; \quad (3)$$

$$A(T) = 0,99 \cdot 10^{-4} \cdot T, \alpha = 10^7 \text{ 1/м}. \quad (4)$$

В качестве материала основы образца рассматривалась сталь 40X с температурными зависимостями свойств следующего вида [6, с. 146]:

$$\lambda_2(T) = 40,62 + 0,013 \cdot T - 4,847 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,405 \cdot 10^{-8} \cdot T^3, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (5)$$

$$c_2(T) = 364,726 + 0,507 \cdot T - 1,048 \cdot 10^{-4} \cdot T^2, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (6)$$

$$\rho_2(T) = 7,918 \cdot 10^3 - 0,032 \cdot T, \text{ кг/м}^3. \quad (7)$$

Математическая модель процесса теплопроводности в обрабатываемом лазерным излучением двухслойном теле с учетом релаксации теплового потока и температурной зависимости свойств материалов для случая, когда поглощение энергии излучения моделируется объемным источником тепла, включает в себя систему нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности [5, с. 176, 177]:

$$\begin{aligned} \tau_{r,1} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(c_1(T_1) \rho_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} \right) + c_1(T_1) \rho_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right) + \\ + \alpha e^{-\alpha x} A(T_1) q_0(\tau) + \tau_{r,1} \alpha e^{-\alpha x} \frac{\partial (A(T_1) q_0(\tau))}{\partial \tau}, \quad 0 < x < x^*, \quad 0 < \tau \leq \tau_m; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r,2} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(c_2(T_2) \rho_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} \right) + c_2(T_2) \rho_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right), \\ x^* < x < L, \quad 0 < \tau \leq \tau_m; \end{aligned} \quad (9)$$

начальные условия:

$$T_v(x, 0) = T_0, \quad x \in [0, L], \quad v = \overline{1, 2}; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial T_v(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad x \in [0, L], \quad v = \overline{1, 2}; \quad (11)$$

условия на внешних границах:

$$\left. \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_m; \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad 0 < \tau \leq \tau_m; \quad (13)$$

граничные условия на стыке слоев:

$$T_1(x^*, \tau) = T_2(x^*, \tau); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x^*} + \tau_{r,2} \frac{d}{d\tau} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right) \Big|_{x=x^*} = \\ = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x^*} + \tau_{r,1} \frac{d}{d\tau} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right) \Big|_{x=x^*}, \quad 0 < \tau \leq \tau_m, \end{aligned} \quad (15)$$

где $T_v(x, \tau)$ – температура тела в точке x в момент времени τ для соответствующего слоя (для покрытия $v=1$, для основы $v=2$); $\lambda_1(T_1)$, $\lambda_2(T_2)$ – коэффициенты теплопроводности, $c_1(T_1)$, $c_2(T_2)$ – теплоемкости, $\rho_1(T_1)$, $\rho_2(T_2)$ – плотности веществ; $\tau_{r,v}$ – время релаксации теплового потока для соответствующего слоя; $A(T_1)$ – поглощательная способность материала; α – коэффициент поглощения; $q_0(\tau)$ – плотность потока энергии излучения.

Для реализации метода сеток при решении задачи (8) – (15) используем прямоугольную пространственно-временную сетку $G_{x\tau} = \{x_i = (i-1)h, i = \overline{1, N}; \tau_j = jk, j = \overline{0, M}\}$. Число узлов по пространственной координате определяется по соотношению $N = N_1 + N_2 + 1$, где N_v – количество промежутков, на которое разбивается слой покрытия или основы.

При рассмотрении трехслойной неявной разностной схемы и замене частных производных по времени и пространству на соответствующие разностные аналоги [13, с. 455] в нелинейных гиперболических уравнениях теплопроводности (8), (9), получаем разностные уравнения вида:

$$\gamma_{1,i}^{j+1} \frac{T_{1,i}^{j+1} - T_{1,i}^j}{k} + \frac{\tau_{r,1}}{k} \left(\frac{\gamma_{1,i}^{j+1} + \gamma_{1,i}^j}{2} \cdot \frac{T_{1,i}^{j+1} - T_{1,i}^j}{k} - \frac{\gamma_{1,i}^{j-1} + \gamma_{1,i}^j}{2} \cdot \frac{T_{1,i}^j - T_{1,i}^{j-1}}{k} \right) =$$

$$= \frac{1}{h} \left(\frac{\lambda_{1,i}^{j+1} + \lambda_{1,i+1}^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_{1,i+1}^{j+1} - T_{1,i}^{j+1}}{h} - \frac{\lambda_{1,i-1}^{j+1} + \lambda_{1,i}^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_{1,i}^{j+1} - T_{1,i-1}^{j+1}}{h} \right) + f_i^{j+1}; \quad (16)$$

$$\gamma_{2,i}^{j+1} \frac{T_{2,i}^{j+1} - T_{2,i}^j}{k} + \frac{\tau_{r,2}}{k} \left(\frac{\gamma_{2,i}^{j+1} + \gamma_{2,i}^j}{2} \cdot \frac{T_{2,i}^{j+1} - T_{2,i}^j}{k} - \frac{\gamma_{2,i}^{j-1} + \gamma_{2,i}^j}{2} \cdot \frac{T_{2,i}^j - T_{2,i}^{j-1}}{k} \right) =$$

$$= \frac{1}{h} \left(\frac{\lambda_{2,i}^{j+1} + \lambda_{2,i+1}^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_{2,i+1}^{j+1} - T_{2,i}^{j+1}}{h} - \frac{\lambda_{2,i-1}^{j+1} + \lambda_{2,i}^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_{2,i}^{j+1} - T_{2,i-1}^{j+1}}{h} \right), \quad (17)$$

где $\gamma_{v,i}^{j+1} = c_v(T_{v,i}^{j+1}) \rho_v(T_{v,i}^{j+1}) \cdot 10^{-9}$, $\lambda_{v,i}^{j+1} = \lambda_v(T_{v,i}^{j+1}) \cdot 10^{-6}$, $v = \overline{1, 2}$; $c_v(T_{v,i}^{j+1})$, $\rho_v(T_{v,i}^{j+1})$, $\lambda_v(T_{v,i}^{j+1})$ вычисляются по формулам (1) – (3), (5) – (7), $i = \overline{2, N-1}$, $j = \overline{1, M-1}$. Формула для определения f_i^{j+1} имеет вид:

$$f_i^{j+1} = As_i^{j+1} q_{\max} \sin \frac{\pi k(j+1)}{\tau_d} \mu e^{-\mu h(i-1)} +$$

$$+ \tau_{r,1} \mu e^{-\mu h(i-1)} \left(0,99 \cdot 10^{-4} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} q_{\max} \sin \frac{\pi k(j+1)}{\tau_d} + As_i^{j+1} \frac{\pi q_{\max}}{\tau_d} \cos \frac{\pi k(j+1)}{\tau_d} \right), \quad (18)$$

где $As_i^{j+1} = A(T_{1,i}^{j+1})$ и вычисляется по формуле (4), $\mu = \alpha = 10 \text{ 1/мкм}$.

Модифицируя метод прогонки для пятиточечной разностной схемы, используем метод простой итерации для итерационного уточнения коэффициентов. В этом случае на каждом временном слое расчет значений сеточной функции происходит до тех пор, пока значения на текущей итерации не перестанут отличаться от предыдущего приближения. При этом системы (16), (17) являются линейными относительно $T_{1,i}^{s+1}$ и $T_{2,i}^{s+1}$ соответственно и принимают вид:

$$2kh^2 \gamma_{1,i}^s (T_{1,i}^{s+1} - T_{1,i}^j) + \tau_{r,1} h^2 \left[(\gamma_{1,i}^s + \gamma_{1,i}^j) \cdot (T_{1,i}^{s+1} - T_{1,i}^j) - (\gamma_{1,i}^{j-1} + \gamma_{1,i}^j) \cdot (T_{1,i}^j - T_{1,i}^{j-1}) \right] =$$

$$= k^2 \left[(\lambda_{1,i}^s + \lambda_{1,i+1}^s) \cdot (T_{1,i+1}^{s+1} - T_{1,i}^{s+1}) - (\lambda_{1,i-1}^s + \lambda_{1,i}^s) \cdot (T_{1,i}^{s+1} - T_{1,i-1}^{s+1}) \right] + 2 f_i^s k^2 h^2; \quad (19)$$

$$2kh^2 \gamma_{2,i}^s (T_{2,i}^{s+1} - T_{2,i}^j) + \tau_{r,2} h^2 \left[(\gamma_{2,i}^s + \gamma_{2,i}^j) \cdot (T_{2,i}^{s+1} - T_{2,i}^j) - (\gamma_{2,i}^{j-1} + \gamma_{2,i}^j) \cdot (T_{2,i}^j - T_{2,i}^{j-1}) \right] =$$

$$= k^2 \left[(\lambda_{2,i}^s + \lambda_{2,i+1}^s) \cdot (T_{2,i+1}^{s+1} - T_{2,i}^{s+1}) - (\lambda_{2,i-1}^s + \lambda_{2,i}^s) \cdot (T_{2,i}^{s+1} - T_{2,i-1}^{s+1}) \right], \quad (20)$$

где s – номер итерации. Для определения прогоночных коэффициентов системы (19) и (20) приводят к виду:

$$A_{v,i} \cdot T_{v,i+1}^{s+1} - B_{v,i} \cdot T_{v,i}^{s+1} + C_{v,i} \cdot T_{v,i-1}^{s+1} = F_{v,i}, \quad (21)$$

где $v = \overline{1, 2}$; $A_{v,i} = k^2 (\lambda_{v,i}^s + \lambda_{v,i+1}^s)$, $B_{v,i} = k^2 (\lambda_{v,i-1}^s + 2\lambda_{v,i}^s + \lambda_{v,i+1}^s) + 2kh^2\gamma_{v,i}^s + \tau_{r,v}h^2 (\gamma_{v,i}^s + \gamma_{v,i}^j)$,
 $C_{v,i} = k^2 (\lambda_{v,i}^s + \lambda_{v,i-1}^s)$, $F_{1,i} = -2f_i^s k^2 h^2 + \tau_{r,1} h^2 T_{1,i}^{j-1} (\gamma_{1,i}^j + \gamma_{1,i}^{j-1}) - h^2 T_{1,i}^j [2k\gamma_{1,i}^s + \tau_{r,1} (\gamma_{1,i}^s + 2\gamma_{1,i}^j + \gamma_{1,i}^{j-1})]$
 $F_{2,i} = \tau_{r,2} h^2 T_{2,i}^{j-1} (\gamma_{2,i}^j + \gamma_{2,i}^{j-1}) - h^2 T_{2,i}^j [2k\gamma_{2,i}^s + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i}^s + 2\gamma_{2,i}^j + \gamma_{2,i}^{j-1})]$.

Подставляя соотношение прогонки $T_{v,i-1}^{s+1} = \alpha_{i-1} \cdot T_{v,i}^{s+1} + \beta_{i-1}$ в уравнение (21), получаем формулы для расчета прогоночных коэффициентов на каждой итерации:

$$\alpha_i = \frac{A_{v,i}}{B_{v,i} - C_{v,i} \cdot \alpha_{i-1}}; \quad (22)$$

$$\beta_i = \frac{C_{v,i} \cdot \beta_{i-1} - F_{v,i}}{B_{v,i} - C_{v,i} \cdot \alpha_{i-1}}. \quad (23)$$

Определяя коэффициенты $F_{v,i}$ на первом временном слое, используем соотношение для фиктивных узлов $T_{v,i}^{-1} = T_{v,i}^0$, полученное из аппроксимации начального условия (11):

$$F_{1,i}^1 = -2f_i^s k^2 h^2 - h^2 T_{1,i}^0 [2k\gamma_{1,i}^s + \tau_{r,1} (\gamma_{1,i}^s + \gamma_{1,i}^0)]; \quad (24)$$

$$F_{2,i}^1 = -h^2 T_{2,i}^0 [2k\gamma_{2,i}^s + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i}^s + \gamma_{2,i}^0)]. \quad (25)$$

Для определения начальных прогоночных коэффициентов α_1, β_1 используется неоднородное уравнение (8), моделирующее температурное поле покрытия в случае объемного поглощения, и граничное условие (12). Следовательно, для вывода формул начальных прогоночных коэффициентов можно использовать соотношения, полученные в работе [12, с. 128] при решении задачи теплопроводности в обрабатываемом лазерным излучением однослойном материале для случая объемного поглощения. При аппроксимации левого граничного условия с погрешностью $O(h^2)$ и в зависимости от временного слоя формулы для коэффициентов α_1, β_1 имеют вид:

$$\alpha_1^{s+1} = \frac{2k^2 (\lambda_{1,1}^s + \lambda_{1,2}^s)}{2kh^2\gamma_{1,1}^s + \tau_{r,1}h^2 (\gamma_{1,1}^s + \gamma_{1,1}^j) + 2k^2 (\lambda_{1,1}^s + \lambda_{1,2}^s)}; \quad (26)$$

$$\beta_1^{s+1} = \frac{2f_1^s k^2 h^2 - \tau_{r,1} h^2 T_{1,1}^{j-1} (\gamma_{1,1}^j + \gamma_{1,1}^{j-1}) + T_{1,1}^j [2kh^2\gamma_{1,1}^s + \tau_{r,1}h^2 (\gamma_{1,1}^s + 2\gamma_{1,1}^j + \gamma_{1,1}^{j-1})]}{2kh^2\gamma_{1,1}^s + \tau_{r,1}h^2 (\gamma_{1,1}^s + \gamma_{1,1}^j) + 2k^2 (\lambda_{1,1}^s + \lambda_{1,2}^s)}; \quad (27)$$

$$\beta_1^1 = \frac{T_{1,1}^0 [2kh^2\gamma_{1,1}^s + \tau_{r,1}h^2 (\gamma_{1,1}^s + \gamma_{1,1}^0)] + 2f_1^s k^2 h^2}{2kh^2\gamma_{1,1}^s + \tau_{r,1}h^2 (\gamma_{1,1}^s + \gamma_{1,1}^0) + 2k^2 (\lambda_{1,1}^s + \lambda_{1,2}^s)}. \quad (28)$$

Прогоночные коэффициенты в точке контакта двух сред выводим из аппроксимации граничного условия четвертого рода с погрешностью $O(h^2 + k)$. Разностные аппроксимации

для $\lambda_1(T_1(x^*, \tau_s)) \frac{\partial T_1(x, \tau_s)}{\partial x} \Big|_{x=x^*}$ и $\lambda_2(T_2(x^*, \tau_s)) \frac{\partial T_2(x, \tau_s)}{\partial x} \Big|_{x=x^*}$ получаем с применением разложения функций $\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x}$ и $\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x}$ в ряд Тейлора в окрестностях точек $x_{i-\frac{1}{2}}^*$ и

$x_{i+\frac{1}{2}}^*$ соответственно до членов первого порядка относительно $\frac{h}{2}$, где $x_{i-\frac{1}{2}}^* = \frac{x_{i-1}^* + x_i^*}{2}$,

$x_{i^*+1/2} = \frac{x_{i^*+1} + x_{i^*}}{2}$. При этом аппроксимация частных производных $\left. \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau_s)}{\partial x} \right) \right|_{x=x^*}$ и $\left. \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau_s)}{\partial x} \right) \right|_{x=x^*}$ проводится с учетом уравнений теплопроводности (8), (9) и разностных уравнений (19), (20). Используя аппроксимации для смешанных частных производных [13], получаем соотношение:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*-1}^s}{2} \cdot \frac{T_{1,i^*}^{s+1} - T_{1,i^*-1}^{s+1}}{h} + \frac{h}{2} \left[\gamma_{1,i^*}^s \frac{T_{1,i^*}^{s+1} - T_{1,i^*}^j}{k} + \frac{\tau_{r,1}}{k} \left(\frac{\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{1,i^*}^j}{2} \cdot \frac{T_{1,i^*}^{s+1} - T_{1,i^*}^j}{k} - \frac{\gamma_{1,i^*}^j + \gamma_{1,i^*}^{j-1}}{2} \cdot \frac{T_{1,i^*}^j - T_{1,i^*}^{j-1}}{k} \right) - f_{i^*}^s \right] + \\ & + \frac{\tau_{r,2}}{h} \left[\frac{\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*}^j}{2} \cdot \frac{T_{1,i^*}^{s+1} - T_{1,i^*}^j}{k} - \frac{\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^j}{2} \cdot \frac{T_{1,i^*-1}^{s+1} - T_{1,i^*-1}^j}{k} \right] = \\ & = \frac{\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*+1}^s}{2} \cdot \frac{T_{2,i^*+1}^{s+1} - T_{2,i^*}^{s+1}}{h} - \frac{h}{2} \left[\gamma_{2,i^*}^s \frac{T_{2,i^*+1}^{s+1} - T_{2,i^*}^j}{k} + \frac{\tau_{r,2}}{k} \left(\frac{\gamma_{2,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^j}{2} \cdot \frac{T_{2,i^*+1}^{s+1} - T_{2,i^*}^j}{k} - \frac{\gamma_{2,i^*}^j + \gamma_{2,i^*}^{j-1}}{2} \cdot \frac{T_{2,i^*}^j - T_{2,i^*}^{j-1}}{k} \right) \right] + \\ & + \frac{\tau_{r,1}}{h} \left[\frac{\lambda_{2,i^*+1}^s + \lambda_{2,i^*+1}^j}{2} \cdot \frac{T_{2,i^*+1}^{s+1} - T_{2,i^*+1}^j}{k} - \frac{\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*}^j}{2} \cdot \frac{T_{2,i^*}^{s+1} - T_{2,i^*}^j}{k} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Подставляя в уравнение (29) соотношение прогонки $T_{1,i^*-1}^{s+1} = \alpha_{i^*-1} \cdot T_{1,i^*}^{s+1} + \beta_{i^*-1}$ и выражая $T_{i^*}^{s+1} = T_{1,i^*}^{s+1} = T_{2,i^*}^{s+1}$, получаем формулы для прогоночных коэффициентов в точке $x = x^*$:

$$\alpha_{i^*} = \frac{2k^2 (\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*+1}^s) + 2k\tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*+1}^s + \lambda_{2,i^*+1}^j)}{p_{i^*}}, \quad (30)$$

$$\beta_{i^*} = \frac{m_{i^*}}{p_{i^*}}, \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{где } m_{i^*} &= 2k\beta_{i^*-1} \left[k (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*-1}^s) + \tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^j) \right] + h^2 T_{i^*}^j \left[\tau_{r,1} (\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{1,i^*}^j) + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^j) \right] + \\ & + 2kh^2 T_{i^*}^j (\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^s) + 2kT_{i^*}^j \left[\tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*}^j) + \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*}^j) - \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*+1}^s + \lambda_{2,i^*+1}^j) \right] + 2k^2 h^2 f_{i^*}^s - \\ & - 2k\tau_{r,2} T_{i^*-1}^j (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^j) + h^2 (T_{i^*}^j - T_{i^*}^{j-1}) \left[\tau_{r,1} (\gamma_{1,i^*}^{j-1} + \gamma_{1,i^*}^j) + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i^*}^{j-1} + \gamma_{2,i^*}^j) \right]; \\ p_{i^*} &= 2k^2 \left[(\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*-1}^s) (1 - \alpha_{i^*-1}) + \lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*+1}^s \right] + 2k \left[\tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*}^j) + \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*}^j) \right] - \\ & - 2k\tau_{r,2} \alpha_{i^*-1} (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^j) + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^j) + \tau_{r,1} (\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{1,i^*}^j). \end{aligned}$$

На первом временном слое коэффициент β_{i^*} в точке сопряжения имеет вид:

$$\beta_{i^*}^1 = \frac{m_{i^*}^1}{p_{i^*}^1}, \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{где } m_{i^*}^1 &= 2k\beta_{i^*-1}^1 \left[k (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*-1}^s) + \tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^0) \right] + h^2 T_{i^*}^0 \left[\tau_{r,1} (\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{1,i^*}^0) + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^0) \right] + \\ & + 2kh^2 T_{i^*}^0 (\gamma_{1,i^*}^s + \gamma_{2,i^*}^s) + 2kT_{i^*}^0 \left[\tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*}^0) + \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*}^0) - \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*+1}^s + \lambda_{2,i^*+1}^0) \right] + 2k^2 h^2 f_{i^*}^s - \\ & - 2k\tau_{r,2} T_{i^*-1}^0 (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^0), \quad p_{i^*}^1 = 2k \left[\tau_{r,2} (\lambda_{1,i^*}^s + \lambda_{1,i^*}^0) + \tau_{r,1} (\lambda_{2,i^*}^s + \lambda_{2,i^*}^0) \right] - 2k\tau_{r,2} \alpha_{i^*-1}^1 (\lambda_{1,i^*-1}^s + \lambda_{1,i^*-1}^0) + \end{aligned}$$

$$+2k^2 \left[(\lambda_{1,i}^s + \lambda_{1,i-1}^s)(1 - \alpha_{i-1}) + \lambda_{2,i}^s + \lambda_{2,i+1}^s \right] + 2kh^2 (\gamma_{1,i}^s + \gamma_{2,i}^s) + \tau_{r,2} (\gamma_{2,i}^s + \gamma_{2,i}^0) + \tau_{r,1} (\gamma_{1,i}^s + \gamma_{1,i}^0).$$

Учитывая, что при определении значений температуры на правой границе рассматривается однородное гиперболическое уравнение (9), моделирующее температурное поле материала основы, и граничное условие (13), для вывода формул можно использовать соотношения, полученные при решении задачи о лазерном нагреве тела с покрытием при обработке концентрированными потоками энергии в случае поверхностного поглощения, приведенные в работе [11]. Следовательно, формулы для вычисления значений температуры на правой границе, в том числе для первого временного слоя, полученные из аппроксимации правого граничного условия с погрешностью $O(h^2)$, имеют вид:

$$T_{2,N}^{s+1} = \frac{2k^2 \beta_{N-1} (\lambda_{2,N}^s + \lambda_{2,N-1}^s) + T_{2,N}^j h^2 [\gamma_{2,N}^s (2k + \tau_{r,2}) + \tau_{r,2} (2\gamma_{2,N}^j + \gamma_{2,N}^{j-1})] - \tau_{r,2} h^2 T_{2,N}^{j-1} (\gamma_{2,N}^j + \gamma_{2,N}^{j-1})}{2kh^2 \gamma_{2,N}^s + \tau_{r,2} h^2 (\gamma_{2,N}^s + \gamma_{2,N}^j) + 2k^2 (\lambda_{2,N}^s + \lambda_{2,N-1}^s)(1 - \alpha_{N-1})}; \quad (33)$$

$$T_{2,N}^1 = \frac{2k^2 \beta_{N-1} (\lambda_{2,N}^s + \lambda_{2,N-1}^s) + T_{2,N}^0 h^2 [\gamma_{2,N}^s (2k + \tau_{r,2}) + \tau_{r,2} \gamma_{2,N}^0]}{2kh^2 \gamma_{2,N}^s + \tau_{r,2} h^2 (\gamma_{2,N}^s + \gamma_{2,N}^0) + 2k^2 (\lambda_{2,N}^s + \lambda_{2,N-1}^s)(1 - \alpha_{N-1})}. \quad (34)$$

В алгоритме расчета температурного поля реализуется модификация метода прогонки для системы уравнений с пятидиагональной матрицей, предусматривающая использование процедуры расчета значений сеточной функции на верхнем (промежуточном и первом) временном слое с итерационным уточнением коэффициентов.

На этапе прямой прогонки сначала вычисляются начальные прогоночные коэффициенты для поверхностного слоя с использованием формул (22), (23), (24) (26) – (28), далее прогоночные коэффициенты в точке контакта двух сред по формулам (30) – (32), затем определяются прогоночные коэффициенты для материала основы из соотношений (22), (23) (25).

Расчет температурного поля осуществляется на этапе обратной прогонки, начиная с вычисления значений температуры на правой границе по формуле (33) для промежуточного слоя или по формуле (34) для первого слоя. Значения сеточной функции в остальных узлах на текущей итерации устанавливаются с помощью основного соотношения прогонки.

Процесс определения температурного поля на верхнем временном слое завершается в случае, если максимальное отклонение значений температуры на текущей и предыдущей итерациях не будет превосходить заданной точности. При этом значения сеточной функции, полученные на текущей итерации, определяют значения функции на верхнем временном слое.

Безусловная устойчивость предложенной неявной разностной схемы с погрешностью аппроксимации $O(\tau + h^2)$ обеспечивает успешное применение метода прогонки за счет выполнения условия $|\alpha_i| < 1$, $i = 1, N-1$, исключающего быстрый рост погрешности округления, и отличия знаменателей прогоночных коэффициентов от нуля.

Реализация программы численного решения задачи (8) – (15) осуществлялась в системе MathCAD и в среде программирования Dev-C++. Для сравнения и анализа результатов расчетов температурных полей с использованием нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности и соответствующих линейных с учетом среднеинтегральных значений теплофизических и оптических характеристик материалов получено численное решение линейной задачи в двухслойном теле для случая объемного поглощения.

Численное решение линейной задачи получено с использованием метода прогонки при следующих среднеинтегральных значениях теплофизических и оптических характеристик: $\bar{\lambda}_1 = 121 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\bar{\lambda}_2 = 33,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\bar{\gamma}_1 = 2,744 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, $\bar{\gamma}_2 = 4,605 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, $\bar{A} = 0,098$.

На рисунках 1, 2 представлены результаты расчетов температурных полей при решении нелинейной (TNL) и линейной (TL) задач. Графики распределения температуры по толщине покрытия и основы при $\tau = 2$ нс и при $\tau = 5$ нс приведены на рисунке 1. На рисунке 2 представлены графики функции изменения температуры во времени при $x = 0$ мкм и при $x = 0,4$ мкм.

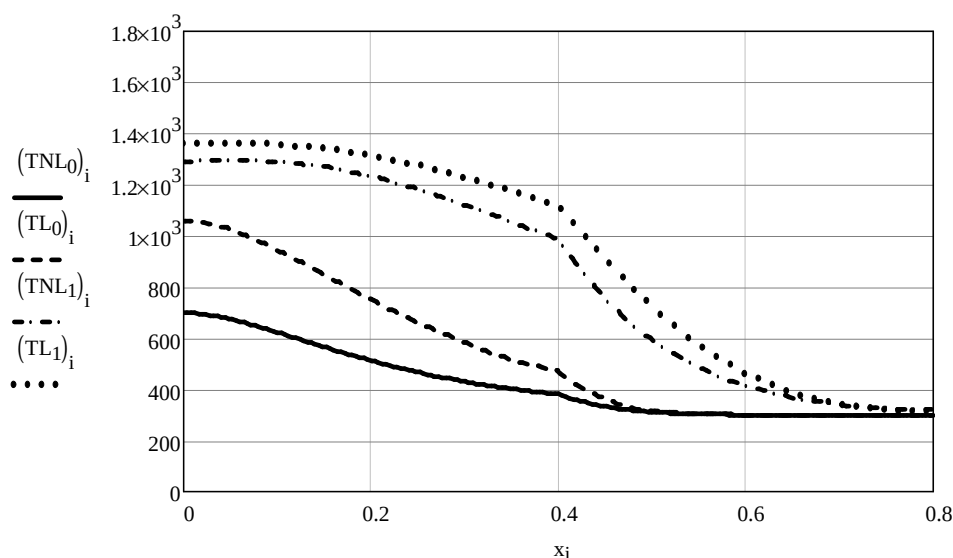


Рисунок 1 – Распределение температуры по толщине покрытия и основы:
при $\tau = 2$ нс (T_{NL_0} , T_{L_0}) и при $\tau = 5$ нс (T_{NL_1} , T_{L_1})

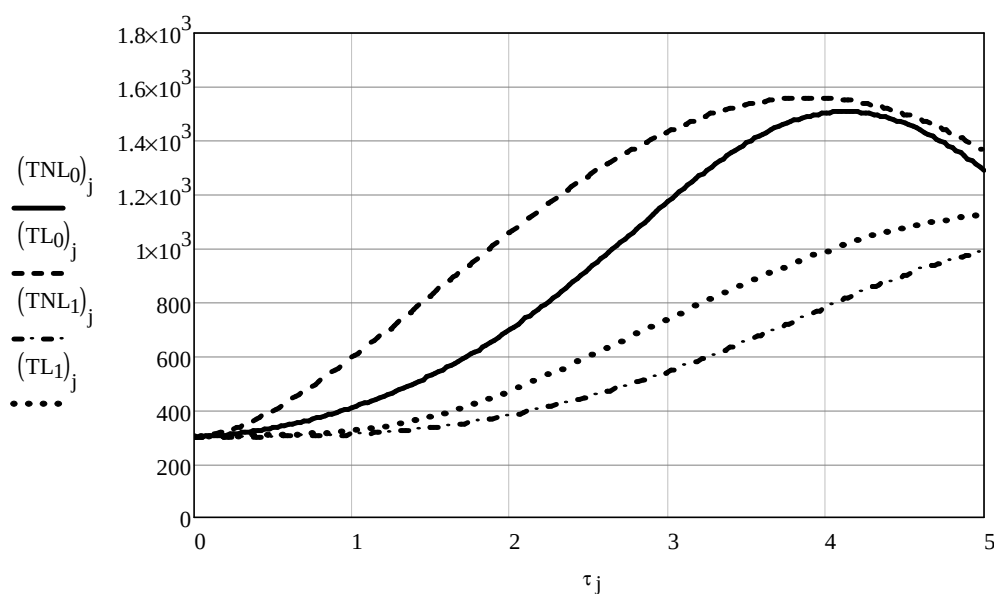


Рисунок 2 – Изменение температуры во времени:
при $x = 0$ мкм (T_{NL_0} , T_{L_0}) и при $x = 0,4$ мкм (T_{NL_1} , T_{L_1})

Полученные результаты сравнимы с результатами расчетов, представленными в работе [6, с. 149 – 150] с использованием приближенного аналитического метода, сочетающего метод пространственно-временных квадрантов и операционный метод. Сопоставимость результатов, рассчитанных при решении предложенным численным методом и приближенным аналитическим, обосновывает достоверность полученных результатов.

На основе существенных отличий в полученных результатах расчетов температурных полей при решении нелинейной и линейной задач можно утверждать о необходимости учета температурной зависимости свойств материалов при обработке лазерным излучением тела с покрытием в случае объемного поглощения.

Представленная нелинейная математическая модель нагрева двухслойного тела с учетом релаксации теплового потока и температурной зависимости теплофизических и оптических характеристик материалов позволяет повысить точность расчета температурных полей при исследовании тепловых процессов с воздействием лазерного излучением на многослойные материалы и может быть эффективна при разработке технологий лазерной обработки в промышленных циклах ОАО «РЖД» и лазерного упрочнения гребней колесных пар.

Список литературы

1. Упрочнение колесной стали волоконными лазерами [Текст] / А. В. Богданов, Н. В. Грезев и др. // Научные технологии в машиностроении / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск. – 2016. – № 9. – С. 30 – 37.
2. Губенко, С. И. Исследование возможности локального лазерного упрочнения зоны выкружки железнодорожных колес [Текст] / С. И. Губенко // Бюллетень результатов научных исследований / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург. – 2014. – № 1 (10). – С. 31 – 37.
3. Исакин, И. А. Методы поверхностной лазерной обработки металлов и сплавов [Текст] / И. А. Исакин // Аспирант / Южный ун-т (ИУБиП). – Ростов-на-Дону. – 2016. – № 2. – С. 49 – 58.
4. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок [Текст] / Под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
5. Малая, Ю. А. Математическое моделирование лазерного нагрева тел с покрытиями на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности [Текст] / Ю. А. Малая, А. И. Губин // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных работ. Тематический выпуск «Энергетические и тепло-технологические процессы и оборудование» / Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический институт». – Харьков. – 2012. – № 7. – С. 174 – 181.
6. Малая, Ю. А. Математическое моделирование процессов теплопроводности с учетом релаксации теплового потока [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Юлия Анатольевна Малая. – Днепропетровск, 2015. – 183 с.
7. Мержиевский, Л. А. Численное моделирование распространения теплового импульса во фрактальной среде [Текст] / Л. А. Мержиевский, А. Н. Корчагина // Материалы междунар. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика» (Новосибирск, 30 мая – 4 июня 2011 г.). URL: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38636/46433/Корчагина-Расширенные%20тезисы.pdf> (доступ свободный).
8. Никитенко, Н. И. Проблемы теории и моделирования интенсивных нестационарных процессов тепло- и массопереноса [Текст] / Н. И. Никитенко // Промышленная теплотехника / Нац. акад. наук Украины, Ин-т техн. теплофизики. – Киев. – 1997. – Т. 19 (№ 4-5). – С. 131 – 137.
9. Огин, П. А. Повышение ресурса мелкоразмерного инструмента за счет модификации изнашиваемых поверхностей при помощи оптоволоконного лазера [Текст] / П. А. Огин, К. Я. Васькин // Труды IV междунар. науч.-техн. конф. «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения) / Тольяттинский гос. ун-т. – Тольятти, 2015. – Ч. 1. – С. 143 – 145.
10. Петров, С. Ю. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар [Текст] / С. Ю. Петров, А. И. Костюкевич, А. А. Рябов // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2013. – № 2. – С. 62 – 69.
11. Петрова, Л. С. Математическое моделирование процессов нагрева многослойных тел при обработке потоками энергии высокой интенсивности на основе системы нелинейных гиперболических уравнений теплопроводности / Л. С. Петрова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9 (№ 4). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN417.pdf> (доступ свободный).
12. Петрова, Л. С. Математическое моделирование процессов нагрева тел при воздействии концентрированных потоков энергии на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности [Текст] / Л. С. Петрова, В. А. Горош, Н. В. Заложный // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 124 – 133.

13. Самарский, А. А. Теория разностных схем: Учебное пособие [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
14. Смирнова, Н. А. Особенности образования структуры при лазерной обработке [Текст] / Н. А. Смирнова, А. И. Мисюров // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М. – 2012. – № SP2. – С. 115 – 129.
15. Солодов, А. П. Mathcad: Дифференциальные модели [Текст] / А. П. Солодов, В. Ф. Очков / Национальный исследовательский ун-т МЭИ. – М., 2002. – 239 с.
16. Шепелева, И. О. Плазменное и лазерное упрочнение бандажа колеса [Текст] / И. О. Шепелева // Вестник научных конференций. – Тамбов: Юком, 2015. – № 2 – 6 (2). – С. 168 – 170.

References

1. Bogdanov A.V., Grezev N.V., Shmelev S.A., Murzakov M.A., Markushov Y. V. Hardening of wheel steel with fiber lasers [Uprochnenie kolesnoj stali volokonnyimi lazerami]. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii – High technology in mechanical engineering*. – Bryansk, 2016, no. 9, pp. 30 – 37.
2. Gubenko S. I. Investigation of the possibility of local laser hardening of the railroad wheel fencing zone [Issledovanie vozmozhnosti lokalnogo lazernogo uprochneniya zony vykruzhki zheleznodorozhnyh koles]. *Byulleten rezultatov nauchnyh issledovanij – Newsletter of research results*. – St. Petersburg, 2014, no. 1 (10), pp. 31 – 37.
3. Isakin I. A. Methods of surface laser treatment of metals and alloys [Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki metallov i splavov]. *Aspirant – Graduate student*. – Rostov-na-Donu, 2016, no. 2, pp. 49 – 58.
4. *Lazernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'-nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok* (Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied developments) / Ed. V. Y. Panchenko. Moscow: Fizmatlit, 2009, 664 p.
5. Malaya Y. A., Gubin A. I. Mathematical modeling of laser heating of bodies with coatings based on the nonlinear hyperbolic heat equation [Matematicheskoe modelirovanie lazernogo nagreva tel s pokrytiyam na osnove nelinejnogo giperbolicheskogo uravneniya teploprovodnosti]. *Vestnik Nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta «Harkovskij politekhnicheskij institut». Sbornik nauchnyh rabot. Tematicheskij vypusk «Energeticheskie i teplotekhnologicheskie processy i oborudovanie»* (Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Collection of scientific works. Thematic issue «Energy and heat engineering processes and equipment»). Kharkiv, 2012, no. 7, pp. 174 – 181.
6. Malaya Y. A. *Matematicheskoe modelirovanie processov teploprovodnosti s uchetom relaksacii teplovogo potoka* (Mathematical modeling of thermal conductivity processes taking into account the relaxation of heat flow). Thesis for a degree of Candidate of Technical Sciences, Dnepropetrovsk, 2015, 183 p.
7. Merzhievsky L. A., Korchagina A. N. Numerical simulation of the propagation of a thermal pulse in a fractal medium [Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya teplovogo impulsa vo fraktalnoj srede]. *Mezhd. konferenciya «Sovremennye problemy prikladnoj matematiki i mekhaniki: teoriya, ehksperiment i praktika»* (Int. conference «Modern problems of applied mathematics and mechanics: theory, experiment and practice»). Novosibirsk, 2011. <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38636/46433/Korchagina-Extended%20abstracts.pdf>
8. Nikitenko N. I. Problems of the theory and modeling of intense nonstationary processes of heat and mass transfer [Problemy teorii i modelirovaniya intensivnyh nestacionarnykh processov teplo- i massoperenosa]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial heat engineering*. Kiev, 1997, vol. 19 (no. 4 – 5), pp. 131 – 137.
9. Ogini P. A., Vaskin K. Y. Increase the resource of a small-sized tool by modifying wear surfaces using fiber-optic laser [Povyshenie resursa melkorazmernogo instrumenta za schet modifikacii iznashivaemykh poverhnostej pri pomoshchi optovolokonnoho lazera]. *Trudy IV Mezhd. nauch.-tekhn. konferencii «Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekty povysheniya ehffektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva»* (Reznikovskie chteniya) (Proceedings IV Int. scientific-techn. Conference «Thermophysical and Technological Aspects of Increasing the Efficiency of Machine-Building Production» (Reznikovsky Readings)). Tolyatti, 2015, p. 1, pp. 143 – 145.

10. Petrov S. Y., Kostiukevich A. I., Ryabov A. A. Strengthening ridges and reducing wear of wheel sets [Uprochnenie grebnej i snizhenie iznosa kolesnyh par]. *Mir transporta – The world of transport*. Moscow, 2013, no. 2, pp. 62 – 69.

11. Petrova L. S. Mathematical modeling of heating processes of multilayer bodies when processing high energy fluxes on the basis of a system of nonlinear hyperbolic heat equation [Matematicheskoe modelirovanie processov nagreva mnogoslojnyh tel pri obrabotke potokami ehnergii vysokoj intensivnosti na osnove sistemy nelinejnyh giperbolicheskikh uravnenij teploprovodnosti]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Scientific open access journal «Naukovedenie»*. 2017, vol. 9 (no. 4). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN417.pdf>

12. Petrova L. S., Gorosh V. A., Zalozhnyy N. V. Mathematical modeling of heating processes of bodies under influence of concentrated energy flows based on nonlinear hyperbolic heat conductivity equation [Matematicheskoe modelirovanie processov nagreva tel pri vozdejstvii koncentrirovannyh potokov ehnergii na osnove nelinejnogo giperbolicheskogo uravneniya teploprovodnosti]. *Izvestiya Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*. – Omsk, 2017, no. 2 (30), pp. 124 – 133.

13. Samarsky A. A. *Teoriya raznostnyh shem: uchebnoe posobie dlja vuzov* (The theory of difference schemes: a textbook for high schools). M.: Nauka, 1977, 656 p.

14. Smirnova N. A., Misyurov A. I. Features of structure formation during laser processing [Osobennosti obrazovaniya struktury pri lazernoj obrabotke]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie» – Bulletin of MGTU N. E. Bauman. Series «Mechanical Engineering»*. Moscow, 2012, no. SP2, pp. 115 – 129.

15. Solodov A. P., Ochkov V. F. Mathcad: Differential models [Differencial'nye modeli]. Moscow, 2002, 239 p.

16. Shepeleva I. O. Plasma and laser hardening of the wheel brace [Plazmennoe i lazernoe uprochnenie bandazha kolesa]. *Vestnik nauchnykh konferencij – Bulletin of scientific conferences*. Tambov, 2015, no. 2 – 6 (2), pp. 168 – 170.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петрова Лилия Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: petrov.306@mail.ru

Крюкова Яна Витальевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

E-mail: ynychik@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петрова, Л. С. Математическое моделирование процессов высокоинтенсивного нагрева тел с покрытиями при обработке поверхности лазерным излучением [Текст] / Л. С. Петрова, Я. В. Крюкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 118 – 129.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrova Liliya Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Pedagogic, Associate Professor of the department «Higher Mathematics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: petrov.306@mail.ru

Kryukova Yana Vitalevna

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Undergraduate of the department «Power system», OSTU.

E-mail: ynychik@inbox.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrova L. S., Kryukova Y. V. Mathematical modeling of high-intensity heating processes of bodies with coating under surface processing by laser radiation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no 1, pp. 118 – 129 (In Russian).

Р. Г. Король, А. В. Дороничев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,
Российская Федерация

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ «СУХИХ ПОРТОВ» ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ

Аннотация. В настоящее время большое внимание уделяется созданию терминально-логистических комплексов «сухой порт» для эффективного функционирования транспортного узла. «Сухой порт» – это один из возможных способов увеличения пропускной способности транспортного узла. Пропускная способность транспортного узла зависит от следующих взаимосвязанных элементов – инфраструктурных решений, технологических, технических, организационных и экзогенных. Недостаточность технического оснащения, низкий уровень производственной культуры, информационная несогласованность приводят к сверхнормативному простоем транспортных средств на причалах и терминально-складских объектах порта. Технические устройства, маневровые средства, подъемно-транспортное оборудование не справляются с возрастающим потоком транспорта, контейнеров и грузов, что приводит к парализации движения грузовых потоков. В результате происходит скопление вагонов на подходах к транспортному узлу, образуются «брошенные» составы. Несоблюдение логистических принципов управления продвижением грузопотока при организации смешанных перевозок требуют современного подхода к организации эффективной работы транспортного узла. В данной работе условие эффективного взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в системе «станция – порт» представлено в виде теоретико-множественной модели. Рассмотрены элементы, составляющие пропускную способность припортовой станции и морского порта. Эффективная интеграция технологических процессов железнодорожного и морского транспорта в транспортном узле зависит от следующих условий: исключение сверхнормативного технологического времени нахождения подвижного состава на путях станции и порта; поступление вагонов в адрес порта согласно перерабатывающим мощностям подъемно-транспортного оборудования и пропускной способности складских объектов; организация переработки грузов и контейнеров по варианту «вагон – судно» и наоборот. Для реализации перечисленных условий необходимо создание системы «сухих портов» для обслуживания дальневосточных транспортных узлов, в этом случае пропускная способность железнодорожной инфраструктуры транспортных узлов рассматривается комплексно с «сухим портом». Движение грузо- и контейнеропотоков в системе «порт – станция – терминал» осуществляется по технологии фидерного движения поездов. Дальнейшее техническое и технологическое развитие транспортных узлов – это организация грузопереработки за пределами порта на терминалах типа «сухой порт».

Ключевые слова: транспортный узел, сухой порт, транспортная логистика, теоретико-множественная модель, взаимодействие видов транспорта.

Roman G. Korol, Aleksandr V. Doronichev

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

THE RATIONALE FOR THE CREATION OF DRY PORTS FOR EFFICIENT FUNCTIONING OF THE FAR EASTERN TRANSPORT HUB

Abstract. Currently, much attention is paid to the creation of terminal «dry port» for maintenance of traffic node. «Dry port» is one of the possible ways to increase capacity of the transport node. The capacity of transport node depends on the following interrelated elements: infrastructure solutions, technological, technical, organizational, and exogenous. Insufficiency of technical equipment, low level of production culture, informational inconsistency - lead to excessive downtime of vehicles at berths and terminal and warehouse facilities of the port. Technical devices, shunting locomotives, lifting and transport equipment cannot cope with the increasing flow of transportation of containers and cargo, leading to paralysis of the movement of freight flows. The result is the accumulation of cars at the entrances to the transportation hub the formation of «abandoned» trains. The lack of logistics management principles of traffic promotion in the organization of multimodal transport required a modern approach to organization of effective work of the transport node. In this work the effective interaction between various types of transport in the transport node is represented in the form of a set-theoretic model. Considered the elements that contribute to the throughput of dry ports and sea port. The efficiency of technological processes systems of interaction of railway and marine transport in the node depends on the following conditions: the actual time of wagons in transportation must comply with regulatory process

time; organization supply wagons in accordance with the processing capabilities of the cargo platforms; ensuring the maximum amount of overload of goods on the «direct option». To implement these conditions it is necessary to organize the interaction of different modes of transport in the transport node together with the terminal «dry port» in the system «terminal – station – port», in which the capacity of the railway component of the transport node is treated comprehensively along with the «dry port». Further technical and technological development of transport nodes is organization of cargo handling outside the port terminal «dry port».

Keywords: transport hub, dry port, transport logistics, set-theoretic model, the interaction of types of transport

На юге Дальнего Востока расположены Владивостокский, Ванинско-Совгаванский, Хасанский и Восточно-Находкинский транспортные узлы. Эти транспортные узлы являются основными, их доля в грузообороте всех портов Дальневосточного бассейна превышает 77 %. Транспортные узлы являются важным звеном при организации смешанных перевозок и совершенствовании процессов взаимодействия видов транспорта [1].

В морских портах Дальневосточного бассейна грузооборот в 2016 г. увеличился на 8,3 % относительно 2015 г. и составил 185,5 млн т. Увеличился грузооборот портов: Восточный – до 68,5 млн т, Ванино – 30,2 млн т, Находка – 23,3 млн т), Владивосток – 14,3 млн т, Посыет – 8,2 млн т (рост составил более 26 %) [2]. При дальнейшем увеличении объемов перевалки грузов возникают проблемы взаимодействия железнодорожного, морского и автомобильного транспорта и, соответственно, нарушение технологии работы транспортного узла. В условиях рыночной экономики при наличии множества частных компаний, осуществляющих свою деятельность в портах, чем крупнее транспортный узел, тем больше он испытывает проблем, связанных с взаимодействием всех участников транспортного процесса, большинство морских портов перестают эффективно выполнять свои функции. Одной из причин этого является несогласованность параметров работы железнодорожного и морского транспорта, что связано с недостаточным развитием припортовых станций и железнодорожных подходов к ним, что периодически приводит к появлению «пробок» и «брошенных» составов на подходах к транспортному узлу [3].

Железнодорожная инфраструктура транспортных узлов не имеет резервов для обслуживания возрастающего грузо- и контейнеропотока морских портов. Путевое развитие станции Владивосток ограничено, строительство дополнительной инфраструктуры осложняется тем, что станция находится в центральной части города и окружена городской агломерацией. Расположенный в порту Владивосток контейнерный терминал имеет достаточную площадь для увеличения перерабатывающей способности, но из-за ограниченности железнодорожных грузовых фронтов не успевает обслуживать все прибывающие вагоны, в результате сортировочные пути «забиваются» вагонами, что приводит к уменьшению пропускной способности станции [4].

Угольные терминалы дальневосточных морских портов постоянно переполнены, организация выгрузки вагонов проходит неудовлетворительно. В «пиковый сезон» с июля по декабрь порты Владивосток, Ванино, Восточный не справляются с поступающим грузопотоком, вагоны находятся на причалах порта под грузовыми операциями от трех до семи суток. Вагоны, приходящие в адрес портов под выгрузку, приходится распределять по станциям Дальневосточной железной дороги, создавая угрозу парализовать движение на восточном участке Транссиба.

Формирование приморских городов осуществлялось путем строительства жилых домов и различных промышленных предприятий рядом с морским портом, город и порт развивались, создавая инфраструктурные ограничения – отсутствие резервных территорий для дополнительного развития терминалов и растущие перегрузки автомобильных дорог, их обслуживающих. Грузовые автомобили следуют на территорию морского порта и обратно по дорогам города, разбивая и разрушая их, создавая заторы, тем самым повышая аварийность на дорогах и ухудшая экологическую ситуацию.

Несоблюдение логистических принципов управления продвижением грузопотока при организации смешанных перевозок, несовершенство транспортной инфраструктуры и технического оснащения требуют современного подхода к организации эффективной работы транспортного узла.

Условие эффективного взаимодействия железнодорожного, автомобильного и морского транспорта в узле можно представить в виде теоретико-множественной модели [3]:

$$GAT + GGT \leq PSM, \quad (1)$$

где GAT – грузопоток (контейнеропоток), поступающий автомобильным транспортом на терминалы порта, т (шт.), $GAT = f(PSA, GA)$, здесь PSA – пропускная способность автомобильных дорог, GA – грузоподъемность автомобиля; GGT – грузопоток (контейнеропоток), поступающий железнодорожным транспортом на грузовые фронты морского порта, т (шт.), $GGT = f(PSG)$; PSM – пропускная способность морского порта.

Пропускная способность железнодорожной станции, обслуживающей морской порт, включает в себя следующие элементы:

$$PSS = [OS, GI, TG, VS, GF, TR_s, VF_s], \quad (2)$$

где $OS = \{p_y [y=1...f]\}$ – множество производственных процессов, выполняемых на станции, $p_y = \{p_{\text{поезд}}, p_{\text{расф}}, p_{\text{под}}, p_{\text{убор}}, p_{\text{нак}}, m_{\text{лок}}, a_{\text{проц}}, p_{\text{ваг}}\}$ – осмотр поезда в приемо-отправочном парке; $p_{\text{расф}}$ – расформирование состава; $p_{\text{под}}$ – подача вагонов на причалы порта, $p_{\text{убор}}$ – уборка вагонов после завершения грузовых операций, $p_{\text{нак}}$ – накопление вагонов в сортировочном парке станции; $m_{\text{лок}}$ – маневровые операции локомотива; $a_{\text{проц}}$ – автоматизация процессов и коммуникационно-информационные технологии на станции;

$GI = \{g_x [x=1...q]\}$ – множество объектов железнодорожной инфраструктуры, $g_x = \{n_{\text{поп}}, n_{\text{сорт}}, v_{\text{жд}}, y_{\text{жд}}\}$, $n_{\text{поп}}$ – количество приемоотправочных путей, $n_{\text{сорт}}$ – количество путей сортировочного парка, $v_{\text{жд}}$ – вместимость в вагонах путей станции, $y_{\text{жд}}$ – наличие сортировочных устройств на станции;

$TG = \{s_z [z=1...d]\}$ – множество технических средств железнодорожной станции, $s_z = \{n_{\text{лок}}^z, n_{\text{поезд}}^z\}$, $n_{\text{лок}}^z$ – количество и загрузка маневровых локомотивов, $n_{\text{поезд}}^z$ – своевременная подача поездных локомотивов;

$VS = \{v_k [k=1...l]\}$ – множество вагонопотоков станции, $v_k = \{r_{\text{пс}}^k, s_{\text{пс}}^k, t_{\text{поезд}}^k\}$, $r_{\text{пс}}^k$ – тип подвижного состава, $t_{\text{поезд}}^k$ – время поступления поезда в парк приема, $s_{\text{пс}}^k$ – включение вагонов в состав поезда по категориям (сборные, маршрутные поезда и т. д.);

$GF = \{n_j [j=1...m]\}$ – множество грузовых фронтов, $n_j = \{n_{\text{г.ф}}^m, n_{\text{об}}^m, c_{\text{об}}^m, p_{\text{об}}^m, l_{\text{гф}}^x\}$, $n_{\text{г.ф}}^m$ – количество грузовых фронтов и их взаимное расположение, $n_{\text{об}}^m$ – количество подъемно-транспортного оборудования на каждом грузовом фронте, $c_{\text{об}}^m$ – техническое состояние механизмов; $p_{\text{об}}^m$ – производительность оборудования; $l_{\text{г.ф}}^x$ – удаленность грузового фронта от станции или от выставочного парка;

$TR_s = \{t_e [e=1...u]\}$ – множество сотрудников станции, $t_e = \{k_{\text{пер}}^u, n_{\text{пер}}^u\}$, $k_{\text{пер}}^u$ – квалификация работников станции; $n_{\text{пер}}^u$ – штатное и сменное количество работников станции;

$VF_s = \{f_a [a=1...w]\}$ – множество факторов, оказывающих влияние на производственные процессы станции, $f_a = \{m_{\text{ф}}^w, r_{\text{ус}}^w, p_{\text{ппп}}^w, t_{\text{лок}}^w\}$, $m_{\text{ф}}^w$ – неблагоприятные природно-климатические условия (снегопад и т. п.), $r_{\text{ус}}^w$ – технологические «окна» на содержание пути и ремонт различных устройств станции, $p_{\text{ппп}}^w$ – непринятие получателем вагонов по различным причинам, $t_{\text{лок}}^w$ – затраты времени на технологические операции по обслуживанию локомотива.

Пропускная способность грузовых фронтов морского порта включает в себя следующие элементы:

$$PSP = [OP, PP, GO, TS, GT, PO, GP, TR_p, VF_p], \quad (3)$$

где $OP = \{k_y [y=1...f]\}$ – множество производственных процессов морского порта, $k_y = \{p_{\text{ваг}}^f, o_{\text{суд}}^f, g_{\text{пв}}^f, g_{\text{ваг}}^f, g_{\text{суд}}^f, a_{\text{проц}}^f\}$, $p_{\text{ваг}}^f$ – приемосдаточные операции в порту; $o_{\text{суд}}^f$ – процесс обработки судна; $g_{\text{го}}^f$ – грузовые операции по вариантам «судно – вагон» и «вагон – судно», $g_{\text{ваг}}^f$ – погрузка и выгрузка подвижного состава, $g_{\text{суд}}^f$ – операции по погрузке и выгрузке морских судов, $a_{\text{проц}}^f$ – автоматизация процессов и коммуникационно-информационные технологии в работе порта;

$PP = \{p_i [i=1...n]\}$ – множество объектов портовой инфраструктуры, $p_i = \{n_{\text{пр}}^i, l_{\text{пр}}^i, b_{\text{пр}}^i, s_{\text{пр}}^i, m_{\text{пр}}^i\}$, $n_{\text{пр}}^i$ – количество причалов, $l_{\text{пр}}^i$ – протяженность причала, $b_{\text{пр}}^i$ – глубина причала, $s_{\text{пр}}^i$ – специализация причала, $m_{\text{пр}}^i$ – оборудование причалов специальными подъемно-транспортными машинами;

$GO = \{s_x [x=1...q]\}$ – множество железнодорожных объектов морского порта, $s_x = \{n_{\text{жд}}^x, v_{\text{грф}}^x, n_{\text{выст}}^x, l_{\text{гр}}^x, c_{\text{жд}}^x\}$, $n_{\text{жд}}^x$ – наличие локомотивов, принадлежащих порту, $v_{\text{грф}}^x$ – вместимость фронта погрузки-выгрузки вагонов, $n_{\text{выст}}^x$ – количество путей под приемосдаточные операции с вагонами, $l_{\text{гр}}^x$ – удаленность места погрузки-выгрузки вагонов от железнодорожной станции, $c_{\text{жд}}^x$ – количество соединительных железнодорожных путей;

$TS = \{t_k [k=1...l]\}$ – множество обрабатываемых транспортных средств, $t_k = \{m_{\text{тр}}^k, g_{\text{тр}}^k, p_{\text{тр}}^k\}$, $m_{\text{тр}}^k$ – вид транспорта, $g_{\text{тр}}^k$ – грузоподъемность подвижного состава, $p_{\text{тр}}^k$ – принадлежность подвижного состава (этот параметр характерен для железнодорожного транспорта);

$GT = \{g_h [h=1...s]\}$ – множество терминально-складских объектов, $g_h = \{e_{\text{тер}}^h, s_{\text{тер}}^h, v_{\text{тер}}^h, a_{\text{тер}}^h\}$, $e_{\text{тер}}^h$ – емкость терминала, $s_{\text{тер}}^h$ – площадь терминала, $v_{\text{тер}}^h$ – конструкция терминала, $a_{\text{тер}}^h$ – уровень механизации и автоматизации работ;

$PO = \{o_j [j=1...m]\}$ – множество подъемно-транспортного оборудования, $o_j = \{n_{\text{об}}^m, t_{\text{об}}^m, c_{\text{об}}^m, g_{\text{об}}^m, p_{\text{об}}^m\}$, $n_{\text{об}}^m$ – количество единиц перегрузочного оборудования, $t_{\text{об}}^m$ – тип перегрузочного оборудования, $c_{\text{об}}^m$ – состояние машин и механизмов; $g_{\text{об}}^m$ – грузоподъемность машин, $p_{\text{об}}^m$ – производительность оборудования;

$GP = \{b_c [c=1...z]\}$ – множество грузо- и контейнеропотоков порта, $b_c = \{r_{\text{гр}}^z, q_{\text{гр}}^z, t_{\text{гр}}^z\}$, $r_{\text{гр}}^z$ – род поступающего груза, $q_{\text{гр}}^z$ – объем перерабатываемого грузо- и контейнеропотока, $t_{\text{гр}}^z$ – время поступления вагонов под грузовые операции;

$TR_p = \{r_e [e=1...u]\}$ – множество сотрудников порта, $r_e = \{k_{\text{пер}}^u, n_{\text{пер}}^u\}$, $k_{\text{пер}}^u$ – квалификация работников порта; $n_{\text{пер}}^u$ – штатное и сменное количество работников станции;

$VF_p = \{v_a [a=1...w]\}$ – множество факторов, оказывающих влияние на производственные процессы морского порта, $v_a = \{t_{\text{об}}^w, m_{\text{ф}}^w, r_{\text{тс}}^w, t_{\text{гр}}^w, p_{\text{см}}^w\}$, $t_{\text{об}}^w$ – затраты времени на технологические операции по обслуживанию подъемно-транспортного оборудования, $m_{\text{ф}}^w$ – природно-климатические факторы, влияющие на работу причала порта (сильный туман, штормовой ураган, неблагоприятная ледовая обстановка); $r_{\text{тс}}^w$ – затраты времени на выполнение ремонта вагонов в порту, $t_{\text{гр}}^w$ – продолжительность выполнения таможенных операций, $p_{\text{см}}^w$ – неустойчивая политическая и экономическая ситуация в регионе, стране, мире.

Категории множеств можно систематизировать в табличной форме по элементам [3] таблицы.

Элементы теоретико-множественной модели «станция – порт»

Элементы системы	Множества PSS	Множества PSP
Инфраструктурные	GI, GF	PP, GO, GT
Технологические	OS, VS	OP, GP
Технические	TG	TS, PO
Организационные	TR _s	TR _p
Внешние	VF _s	VF _p

С помощью метода экспертных оценок установлено, что основные причины, связанные с технологическими нарушениями в системе «морской порт – станция», составляют порядка 40 % относительно всех элементов модели [3]. Эффективность процесса взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в узле определяют следующие условия:

1) продолжительность нахождения вагонов на припортовой станции не должно превышать нормативное технологическое время:

$$\left| \sum_{i=1}^x N_i \cdot T_i^{\text{факт}} - \sum_{i=1}^x N_i \cdot T_i^{\text{техн}} \right| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где N_i – количество вагонов i -го типа, прибывающих на станцию за сутки, вагоны, $i = \overline{1, x}$; $T_i^{\text{факт}}$ – фактическое время выполнения грузовых и маневровых операций с вагонами i -го типа, ч; $T_i^{\text{техн}}$ – технологическое время, установленное на выполнение операций с вагонами i -ого типа, ч; x – виды подвижного состава, поступающих на станцию;

2) организация подвода вагонов с учетом перерабатывающей способности грузовых фронтов:

$$\sum_{m=1}^r \Pi_m \cdot K_m \geq \sum_{i=1}^x N_i \cdot q_i^m, \quad (5)$$

где q_i^m – техническая норма загрузки вагона i -го типа m -м грузом, т/вагон; m – количество номенклатур грузов, перерабатываемых на причалах порта, $m = \overline{1, x}$; Π_m – эксплуатационная производительность подъемно-транспортного оборудования при работе с m -ым грузом, т/сут; K_m – число подъемно-транспортных машин для m -го груза;

3) выполнение максимального количества грузовых операций по варианту «судно-вагон» и «вагон-судно»:

$$\alpha \rightarrow 1, \quad (6)$$

где α – доля перевалки груза по варианту «судно – вагон» и «вагон – судно».

Комплексный критерий оптимальности $K_{PSS-PSP}$, представляющий систему перечисленных выше условий, имеет вид:

$$K_{PSS-PSP} = \begin{cases} \left| \sum_{i=1}^x N_i \cdot T_i^{\text{факт}} - \sum_{i=1}^x N_i \cdot T_i^{\text{техн}} \right| \rightarrow \min; \\ \sum_{m=1}^r \Pi_m \cdot K_m \geq \sum_{i=1}^x N_i \cdot q_i^m; \\ \alpha \rightarrow 1. \end{cases} \quad (7)$$

Для реализации перечисленных условий необходимо создание «сухого порта» для согласованной работы подсистем транспортного узла. При формировании системы «порт – станция – терминал» пропускная способность железнодорожной инфраструктуры транспортного узла $PSGT$ рассматривается комплексно с «сухим портом» (рисунок):

$$PSGT = PSS + PST + PSU, \quad (8)$$

где PST – пропускная способность «сухого порта»; PSU – пропускная способность железнодорожного участка «сухой порт – припортовая станция».

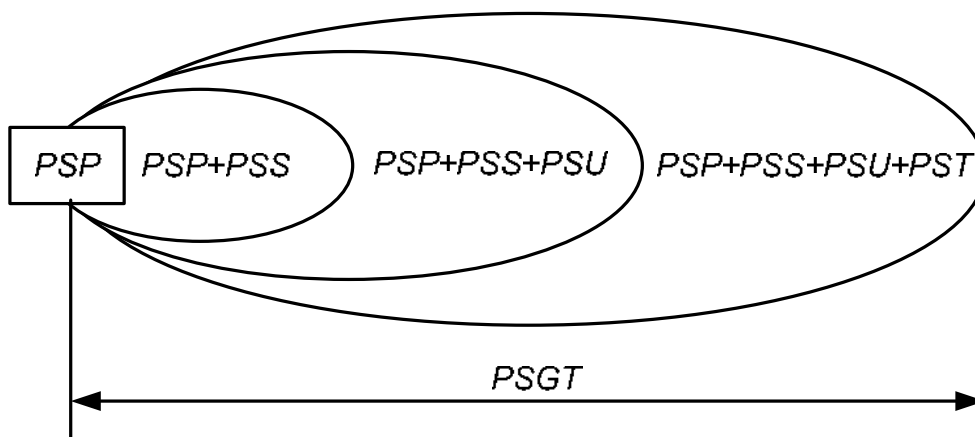
Терминально-логистический комплекс «сухой порт» представляет собой перевалочный пункт, расположенный на удалении от территории порта, который осуществляет связь с морским портом с помощью специально организованной транспортной инфраструктуры, объединяя в едином информационном пространстве всех участников процесса товародвижения [5]. «Сухой порт» выполняет две основные функции: первая – высвобождение причалов и территории порта от скопления грузов и контейнеров, вторая – выполнение роли таможенного терминала. Морской порт предназначен для выполнения операций по обслуживанию морских судов, все операции с грузами и контейнерами (та-

моженное оформление, консолидация, дистрибуция, хранение и пр.) необходимо перенести на «сухой порт».

Функционирование системы «порт – станция – терминал» возможно при выполнении следующих условий:

$$\begin{cases} PSS + PST = PSP; \\ PSU_{\text{нал}}^{\text{сущ}} \geq PSU_{\text{потр}}^{\text{фид}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $PSU_{\text{нал}}^{\text{сущ}}$ – наличная пропускная способность железнодорожного участка при существующей системе организации движения поездов; $PSU_{\text{потр}}^{\text{фид}}$ – потребная пропускная способность железнодорожного участка при внедрении системы фидерного движения поездов (движение «блок-поездов» [6]).



Пропускная способность железнодорожной составляющей транспортного узла PSGT
в системе «порт – станция – терминал»

Исключение «заторов» и убытков от простоев транспортных средств в системе «станция – порт» возможно только при опережающем развитии инфраструктуры станции, обслуживающей порт, и железнодорожных подходов к ней в условиях постоянного увеличения перерабатывающей способности причалов морского порта. Сверхнормативный простой вагонов на припортовой станции в ожидании операций и длительное нахождение вагонов на причалах порта ведут к нерациональному использованию имеющихся ресурсов (финансовых, трудовых, организационных, имущественных) перевозчика и грузовладельцев. Скопление груженых и порожних вагонов на припортовой станции приводит к омертвлению подвижного состава, увеличению оборота вагона, в свою очередь требуется больше вагонов для осуществления перевозок, это может привести к переизбытку вагонов на сети железных дорог. Возникают различные логистические риски. Решение проблемы на припортовых станциях с территориально ограниченными возможностями развития – это организация мест грузопереработки за пределами порта и припортовой станции на терминалах типа «сухой порт» [7].

Функционирование «сухого порта» обеспечивает для ОАО «РЖД» и особенно для станции, обслуживающей морской порт, следующие преимущества [8]:

увеличение пропускной способности портов в результате высвобождения части территории порта и используемого оборудования за счет переноса основной части грузопотока и выполнения операций на тыловых терминалах, на освободившейся территории порта, создание высокотехнологичных комплексов;

вывод процессов переработки и хранения максимально возможного объема грузов за городскую территорию и перевод на режим фидерных железнодорожных перевозок в системе «терминал – порт – терминал», что уменьшит нагрузку на автодорожную инфраструктуру в

результате ограничения количества большегрузного транспорта в городе, а также улучшение экологической обстановки в данном регионе;

ускорение процесса таможенного досмотра и осмотра грузов на пунктах пропуска с применением современных инспекционно-досмотровых комплексов в «сухих портах» [9];

опережающее развитие территорий, включая создание и модернизацию транспортной и складской инфраструктуры региона, организация новых рабочих мест, увеличение налоговых поступлений и др.;

сокращение времени простоя при прибытии и отправлении грузовых поездов, эксплуатационных расходов, количества «брошенных» составов на подходах к порту;

функционирование логистической системы «станция – порт» в «тянущем» режиме (по запросам порта), что исключит вероятность их сгущенного подвода в порты.

Развитая инфраструктура и техническое оснащение «сухого порта» позволят исключить неравномерность поступления грузов и асинхронность производственных процессов на морском и железнодорожном транспорте в узле. Все технологические операции с грузами и контейнерами, включая таможенный осмотр, накопление судовых и вагонных партий, за исключением погрузки и выгрузки судов, будут осуществляться на складских объектах «сухого порта».

В настоящее время наблюдается бурный рост производства провинции Хэйлунцзян Китайской Народной Республики, соседствующей с Хабаровским и Приморским краем. Строительство погранперехода на острове Уссурийский позволит создать транспортный коридор Ванино – Харбин, что послужит дополнительной загрузкой порта Ванино транзитными контейнерными грузами, следующими из Китая и в Китай. В соответствии с инвестиционным проектом «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей» к 2020 г. планируемые грузопотоки в адрес портов Ванино и Советская Гавань могут составить 66 млн т. Грузопотоки таких объемов должны замыкаться на терминалах типа «сухой порт» и затем на основе логистического управления осуществлять подвод и распределение вагонов по причалам морского порта для загрузки-выгрузки конкретных судов.

Создание тыловых терминалов в припортовых районах стран Западной Европы, США, Японии и Китая позволило исключить возникновение «брошенных» составов на подходах к транспортным узлам, что доказывает эффективность логистической системы «сухой порт – станция – морской порт». В России компанией ОАО «РЖД» разработаны проекты по организации «сухих портов» в районе транспортных узлов Санкт-Петербурга (Шушары), Новороссийска (разъезд 9 км) и др. На станции Угловая Дальневосточной железной дороги организован «сухой порт» для приема и обработки рыбной продукции, поступающей со станции Мыс Чуркин. Данные терминалы находятся в начальной стадии развития и должны быть включены в единую систему терминально-складского хозяйства ОАО «РЖД» в рамках Концепции развития терминально-логистических комплексов Российской Федерации [10].

Организация «сухих портов» в транспортных узлах позволит регулировать возрастающий грузо- и контейнеропоток в адрес морских портов путем переориентации основной части грузопотоков из терминалов морских портов на терминальные объекты «сухого порта» и снизить нагрузку на таможенных пунктах пропуска, сократив время доставки внешнеторговых грузов.

Список литературы

1. Белов, А. А. Оценка эксплуатационных характеристик транспортного узла [Текст] / А. А. Белов, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – №1(21). – С. 102 – 112.

2. Король, Р. Г. Технология функционирования Владивостокского транспортного узла при наличии мультимодального терминала «сухой порт» [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – Санкт-Петербург. – 2014. – № 5 (27). – С. 92 – 101.

3. Король, Р. Г. Взаимодействие различных видов транспорта в транспортном узле при наличии терминала «сухой порт» (на примере Владивостокского транспортного узла) [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.01 / Король Роман Григорьевич. – Хабаровск, 2015. – С. 179.

4. Король, Р. Г. Имитационное моделирование системы «железнодорожная станция - морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – Санкт-Петербург. – 2015. – № 3 (31). – С. 209 – 216.

5. Кузнецов, А. Л. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности [Текст] / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. – Санкт-Петербург. – 2013. – № 1 (44). – С. 30 – 33.

6. Рахмангулов, А. Н. Развитие морской портовой инфраструктуры региона на основе «сухих портов» [Текст] / А. Н. Рахмангулов, Д. С. Муравьев // Экономика региона. – Екатеринбург. 2016. – Т. 12. – № 3. – С. 924 – 936.

7. Кузнецов, А. Л. Обоснование концепции «сухого» порта [Текст] / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Транспортное дело России. – М. – 2013. – № 4. – С. 77 – 80.

8. Балалаев, А. С. Методология транспортно-логистического взаимодействия при мультимодальных перевозках [Текст]: Дис... докт. техн. наук: 05.22.01 / Александр Сергеевич Балалаев. – Хабаровск, 2010. – 280 с.

9. Маликова, Т. Е. Применение технологии предварительного информирования таможенных органов при морских внеплановых грузоперевозках [Текст] / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко // Вестник гос. ун-т морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – Санкт-Петербург. – 2016. – № 3 (37). – С. 33 – 45.

10. Король, Р. Г. Функционирование транспортного узла в рамках логистической системы «сухой порт – станция – морской порт» [Текст] / Р. Г. Король, А. В. Дороничев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2015. – № 2 (4). – С. 47 – 49.

References

1. Belov A. A., Larin A. N. Assessment of the operational characteristics of the transport hub [Otsenka ekspluatatsionnykh kharakteristik transportnogo uzla]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 102 – 112.

2. Korol' R. G., Balalae A. S. The technology functions of the Vladivostok transport hub in the presence of multimodal terminal «dry port» [Tekhnologiiia funktsionirovaniia Vladivostokskogo transportnogo uzla pri nalichii mul'timodal'nogo terminala «sukhoi port»]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2014, no. 5 (27), pp. 92 – 101.

3. Korol' R. G. *Vzaimodeistvie razlichnykh vidov transporta v transportnom uzle pri nalichii terminala «sukhoi port» (na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla)* (The interaction of different modes of transport in transport in the presence of the terminal «dry port» (on the example of Vladivostok transport hub). Khabarovsk, FESTU, 2015, pp. 179.

4. Korol' R. G., Balalae A. S. Simulation of the system «railway station, the seaport» on the example of Vladivostok transport hub [Imitatsionnoe modelirovanie sistemy «zheleznodorozhnaia stantsiia -morskoj port» na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla]. *Vestnik Gosudarstven-*

nogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2015, no. 3 (31), pp. 209 – 216.

5. Kuznetsov A. L., Eglit Ia. Ia., Kirichenko A. V. Transport hub: the question of the organization of activities [Transportnyi uzel: k voprosu ob organizatsii deiatel'nosti]. *Journal «Transport of the Russian Federation»*, 2013, no. 1 (44), pp. 30 – 33.

6. Rakhmangulov A. N., Murav'ev D. S. The development of port infrastructure in the region based on «dry ports» [Razvitie morskoi portovoi infrastruktury regiona na osnove «sukhikh portov»]. *Journal «Economy of Region»*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 924 – 936.

7. Kuznetsov A. L., Shcherbakova-Sliusarenko V. N. Study of the concept of «dry» port [Obosnovanie kontseptsii «sukhogo» porta]. *Journal «Transport business of Russia»*, 2013, no. 4, pp. 77 – 80.

8. Balalaev A. S. *Metodologiya transportno-logisticheskogo vzaimodeistviia pri mul'timodal'nykh perevozkakh* (Methodology transport and logistics interaction in multimodal transport). Khabarovsk, FESTU, 2010, pp. 280.

9. Malikova, T. E., Ianchenko A. A. The technology of preliminary informing of customs authorities in the sea of unplanned freight [Primenenie tekhnologii predvaritel'nogo informirovaniia tamo-zhennykh organov pri morskikh vneplanovykh gruzoperevozkakh]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, no. 3 (37), pp. 33 – 45.

10. Korol' R. G., Doronichev A. V. Functioning of the transport node within the logistics system of «dry port – station – seaport» [Funktsionirovanie transportnogo uzla v ramkakh logisticheskoi sistemy «sukhoi port – stantsiia – morskoi port»]. *Journal «Pacific Rim countries transportation system»*. 2015, no. 2 (4). – pp. 47 – 49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-71.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Дороничев Александр Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-71.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Doronichev Aleksandr Vladimirovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Обоснование целесообразности создания «сухих портов» для эффективного функционирования Дальневосточных транспортных узлов [Текст] / Р. Г. Король, А. В. Дороничев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 130 – 138.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R. G., Doronichev A. V. The rationale for the creation of dry ports for efficient functioning of the far eastern transport hub. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no 1, pp. 130 – 138 (In Russian).

М. М. Соколов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПОСТРОЕНИЕ БЕЗУСЛОВНОГО АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТАНЦИОННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация. В статье рассматриваются возможность применения безусловного алгоритма диагностирования применительно к конкретной задаче поиска повреждения в станционной тональной рельсовой цепи. Задачей работы является обоснование возможности применения алгоритмов диагностирования с целью снижения времени поиска и устранения повреждений. Показан порядок составления алгоритма диагностирования, рассчитаны условные вероятности, диагностические веса, частные и общие диагностические ценности. На основании проведенных вычислений составлен безусловный алгоритм диагностирования тональной рельсовой цепи. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы при техническом обслуживании систем автоматики действующих железных дорог.

Ключевые слова: рельсовая цепь, путевого приемник, генератор, диагностирование, алгоритм диагностирования, диагноз, диагностический признак.

Maxim M. Sokolov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

CONSTRUCTION OF UNCONDITIONAL ALGORITHM FOR DIAGNOSTICS OF TONAL RAIL CIRCUITS ON STATION

Abstract. The article deals with the possibility of applying an unconditional diagnostic algorithm, applied to a specific problem of searching for damage in a station's tonal track circuit. The aim of the work is to substantiate the possibility of applying diagnostic algorithms, in order to reduce the time of search and repair of damages. The order of compiling the diagnostic algorithm is shown, conditional probabilities, diagnostic weights, private and general diagnostic values are calculated. On the basis of the calculations performed, an unconditional algorithm for diagnosing the tonal track circuit was compiled. The results obtained in the article can be used for technical maintenance of automation systems of operating railways.

Keywords: track circuit, a track receiver, a generator, diagnosing, diagnosis algorithm, diagnostic indication

Наряду с разработкой и внедрением микропроцессорных устройств и систем диагностики одной из стратегических задач хозяйства автоматики и телемеханики является организация производства с применением современных технологий обслуживания и устранения повреждений устройств СЦБ [1, 2].

Задачей, на которую направлено совершенствование технологии устранения повреждений в устройствах железнодорожной автоматики, является снижение времени устранения этих повреждений с целью минимизации времени простоя или времени нарушения условий безопасности движения поездов. Снижение времени устранения повреждения может быть достигнуто за счет оптимизации процесса локализации отказа (поиска места повреждения) путем применения оптимальной последовательности проверок и правил обработки их результатов (алгоритмов диагностирования) для получения общего результата диагностирования [3].

Выделяют три основных вида алгоритмов диагностирования: безусловный с безусловной остановкой, безусловный с условной остановкой и условный с условной остановкой [3]. В данной работе рассмотрим возможность применения безусловного алгоритма с условной остановкой диагностирования применительно к задаче поиска места повреждения в устройствах СЦБ. Наиболее простым, с точки зрения построения, является безусловный алгоритм.

В качестве объекта исследования рассмотрим станционную тональную рельсовую цепь (ТРЦ) приемоотправочного пути, упрощенная схема которой представлена на рисунке 1 [4].

Первым проявлением отказа в рельсовой цепи, при условии, что заранее известно, что она свободна, является индикация ее занятости на аппарате управления дежурного по станции. Причины появления отказа «ложная занятость» могут быть разнообразны: от проблем с электропитанием до отказа в аппаратуре рельсовой цепи или рельсовой линии. При этом

электромеханику СЦБ необходимо по первичному проявлению отказа в первую очередь сузить место поиска возможных повреждений [5].

Без проведения каких-либо измерений или проверок первичную информацию об отказе в ТРЦ электромеханик может получить по индикации на путевом генераторе (ГПЗ) и путевых приемниках (ПП). На лицевой панели указанных приборов расположены по два светодиода, сигнализирующих о режиме работы. В нормальном режиме работы генератора светодиод VD2 излучает в мигающем режиме, обеспечивая индикацию о правильной работе задающего генератора, а светодиод VD8 излучает непрерывном режиме, свидетельствуя о наличии питания постоянного тока на выходе усилителя. В случае появления отказа в схеме ГПЗ может прекратить излучать один из светодиодов или сразу оба.

При свободном и исправном состоянии рельсовой цепи (нормальный режим работы) светодиоды VD11 и VD12 путевого приемника попеременно мигают с частотой модуляции [6, 7].

Рассмотрим построение безусловного алгоритма диагностирования на основании информации, получаемой от светодиодов на лицевой панели ГПЗ, ПП1 и ПП2, при следующих ограничениях:

- ТРЦ находится в состоянии «ложной занятости» (на аппарате управления ДСП имеется индикация занятости);
- рассматривается только одиночный отказ;
- сложность обследования по всем признакам одинакова.

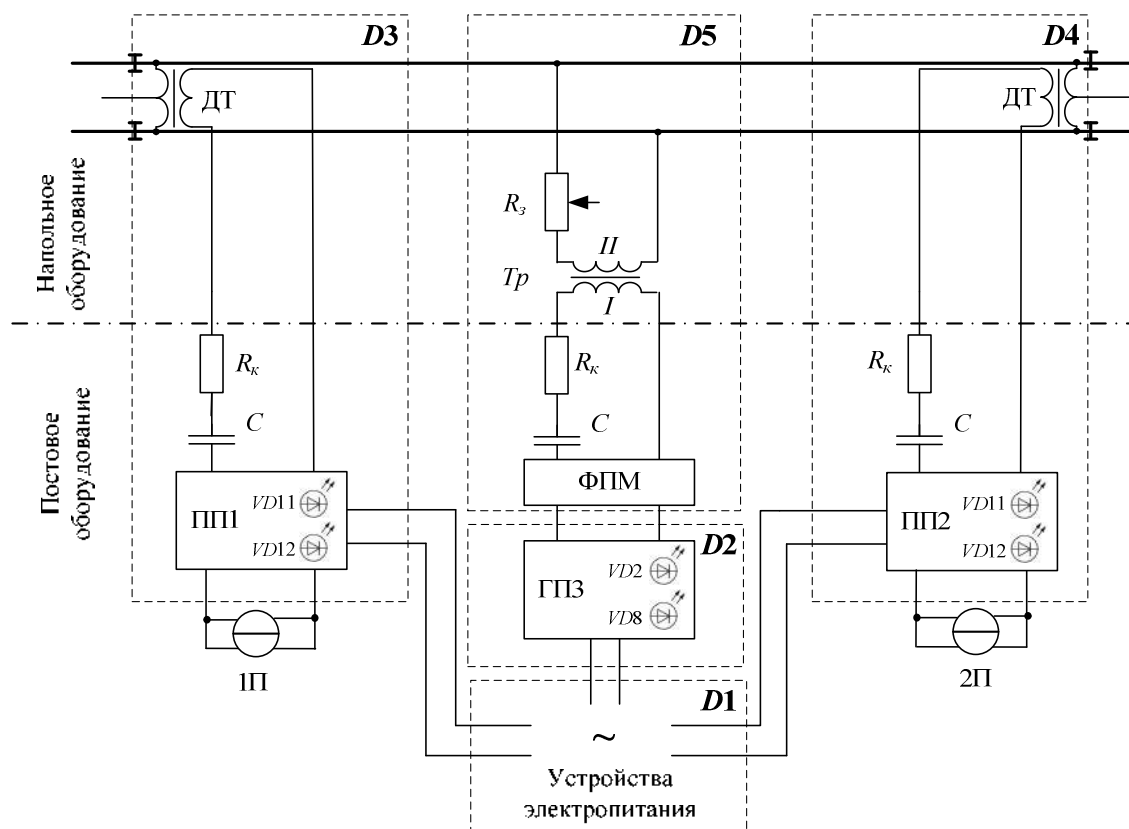


Рисунок 1 – Схема тональной рельсовой цепи

Введем следующие диагностические признаки:

- k_1 – режим работы светодиода VD2 ГПЗ ($k_1 = 1$ – мигает, $k_1 = 0$ – не излучает);
- k_2 – режим работы светодиода VD8 ГПЗ ($k_2 = 1$ – излучает, $k_2 = 0$ – не излучает);
- k_3, k_4 – режим работы светодиодов VD11 и VD12 ПП1 ($k_3 = 1$ – хотя бы один излучает, $k_3 = 0$ – ни один не излучает, $k_4 = 1$ – оба светодиода излучают в мигающем режиме, $k_4 = 0$ – хотя бы один диод излучает, но не мигает);

k_5, k_6 – режим работы светодиодов VD11 и VD12 ПП2 ($k_5 = 1$ – хотя бы один излучает, $k_5 = 0$ – ни один не излучает, $k_6 = 1$ – оба светодиода излучают в мигающем режиме, $k_6 = 0$ – хотя бы один диод излучает, но не мигает).

Введение двух диагностических признаков общей индикации путевых приемников ТРЦ, а не отдельных для каждого светодиода, обусловлено тем, что появление одного и того же отказа в разные моменты времени может привести к разной индикации каждого из светодиодов. Например, индикация «VD11 излучает, VD12 не излучает» несет такую же диагностическую информацию как индикация «VD11 не излучает, VD12 не излучает». При этом каждый из светодиодов в зависимости от места повреждения в ТРЦ может излучать, не излучать или работать в мигающем режиме.

Суммарное проявление указанных шести диагностических признаков позволяет идентифицировать состояние исследуемой системы (ТРЦ) в пяти состояниях (диагнозах) (см. рисунок 1):

D_1 – отказ, связанный с электропитанием оборудования ТРЦ;

D_2 – отказ в схеме ГПЗ (в том числе его электропитание);

D_3 – отказ оборудования первого релейного конца ТРЦ;

D_4 – отказ оборудования второго релейного конца ТРЦ;

D_5 – отказ оборудования питающего конца ТРЦ.

Соответствие между значениями диагностических признаков и диагнозами приведено в таблице 1. Таблица получена путем исключения строк, соответствующих сочетаниям значений признаков, не проявляющихся при одиночных отказах в ТРЦ.

Таблица 1 – Связь значений диагностических признаков с диагнозами

Диагноз	Значение признаков					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
D_1	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0
D_2	0	0	1	0	1	0
	0	1	1	0	1	0
	1	0	1	0	1	0
D_3	1	1	0	0	1	1
	1	1	1	0	1	1
D_4	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	0
D_5	1	1	1	0	1	0

Для получения количества информации о состоянии (диагнозе) объекта, получаемом при оценке значения какого-либо из признаков, необходимо определить информационный вес каждой из реализаций в каждом из диагнозов по выражению [1, 8, 9]:

$$Z_{Di}(k_{js}) = \log_2 \frac{P(k_{js} / D_i)}{P(k_{js})}, \quad (1)$$

где $P(k_{js} / D_i)$ – вероятность появления интервала S признака k_j для объектов с диагнозом D_i ;

$P(k_{js})$ – вероятность появления этого интервала у всех объектов с различными диагнозами.

Для объективной оценки значимости того или иного признака k_j в установлении конкретного диагноза D_i в системе диагнозов D необходимо определить информационную ценность каждого обследования.

Для m -разрядного признака в диагнозе D_i частная диагностическая ценность обследования определяется по выражению:

$$Z_{Di}(k_j) = \sum_{s=1}^m P(k_{js} D_i) Z_{Di}(k_{js}). \quad (2)$$

Известно, что обследование с небольшой диагностической ценностью для одного диагноза может иметь значительную ценность для другого, поэтому целесообразно использовать понятие общей диагностической ценности обследования по признаку k_j для всей системы диагнозов D , определив ее как количество информации, вносимое обследованием в систему диагнозов [8, 9]:

$$S_D(k_j) = \sum_{i=1}^n P(D_i) Z_{Di}(k_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^m P(D_i) P(k_{js} / D_i) \log_2 [P(k_{js} / D_i) / P(k_{js})]. \quad (3)$$

На основании данных таблицы 1, рассчитаем значения условных вероятностей, информационного веса реализаций и частных и общих диагностических ценностей признаков. Для принятых нами допущений $n = 5$, $m = 2$. Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения информационного веса реализаций и частных и общих диагностических ценностей признаков

Признак				k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Диагноз	D_1	$P(D_1) = 2/10 = 0,2$	$P(k_j / D_1)$	0,5	0,5	0	0	0	0
			$P(\overline{k_j} / D_1)$	0,5	0,5	1	1	1	1
			$Z_{D1}(k_j)$	-0,485	-0,485	0	0	0	0
			$Z_{D1}(\overline{k_j})$	0,737	0,737	1,737	0,322	1,737	0,322
			$S_{D1}(k_j)$	0,126	0,126	1,737	0,322	1,737	0,322
	D_2	$P(D_2) = 3/10 = 0,3$	$P(k_j / D_2)$	0,33	0,33	1	0	1	0
			$P(\overline{k_j} / D_2)$	0,67	0,67	0	1	0	1
			$Z_{D2}(k_j)$	-1,085	-1,085	0,515	0	0,515	0
			$Z_{D2}(\overline{k_j})$	1,159	1,159	0	0,322	0	0,322
			$S_{D2}(k_j)$	0,418	0,418	0,515	0,322	0,515	0,322
	D_3	$P(D_3) = 2/10 = 0,2$	$P(k_j / D_3)$	1	1	0,5	0	1	1
			$P(\overline{k_j} / D_3)$	0	0	0,5	1	0	0
			$Z_{D3}(k_j)$	0,515	0,515	-0,485	0	0,515	2,322
			$Z_{D3}(\overline{k_j})$	0	0	0,737	0,322	0	0
			$S_{D3}(k_j)$	0,515	0,515	0,126	0,322	0,515	2,322
	D_4	$P(D_4) = 2/10 = 0,2$	$P(k_j / D_4)$	1	1	1	1	0,5	0
			$P(\overline{k_j} / D_4)$	0	0	0	0	0,5	1
			$Z_{D4}(k_j)$	0,515	0,515	0,515	2,322	-0,485	0
			$Z_{D4}(\overline{k_j})$	0	0	0	0	0,737	0,322
			$S_{D4}(k_j)$	0,515	0,515	0,515	2,322	0,126	0,322
	D_5	$P(D_5) = 1/10 = 0,1$	$P(k_j / D_5)$	1	1	1	0	1	0
			$P(\overline{k_j} / D_5)$	0	0	0	1	0	1
			$Z_{D5}(k_j)$	0,515	0,515	0,515	0	0,515	0
			$Z_{D5}(\overline{k_j})$	0	0	0	0,322	0	0,322
			$S_{D5}(k_j)$	0,515	0,515	0,515	0,322	0,515	0,322
$P(k_j)$				0,7	0,7	0,7	0,2	0,7	0,2
$S_D(k_j)$				0,408	0,408	0,681	0,722	0,681	0,722

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее количество информации о состоянии сигнальной точки может быть получено при оценке признаков k_4 и k_6 , а именно индикация светодиодов на ПП1 и ПП2 соответственно. Действительно, при правильной индикации работы ПП можно сразу исключить повреждения аппаратуры питающего конца ТРЦ, рельсовой линии, аппаратуры релейного конца данного ПП, а также проблемы с электропитанием [10]. Полученные результаты позволяют построить безусловный алгоритм с условной остановкой процесса диагностирования технического состояния ТРЦ. Алгоритм может быть представлен в виде графа (рисунок 2) с последовательностью проверок $k_4 - k_6 - k_5 - k_3 - k_2 - k_1$.

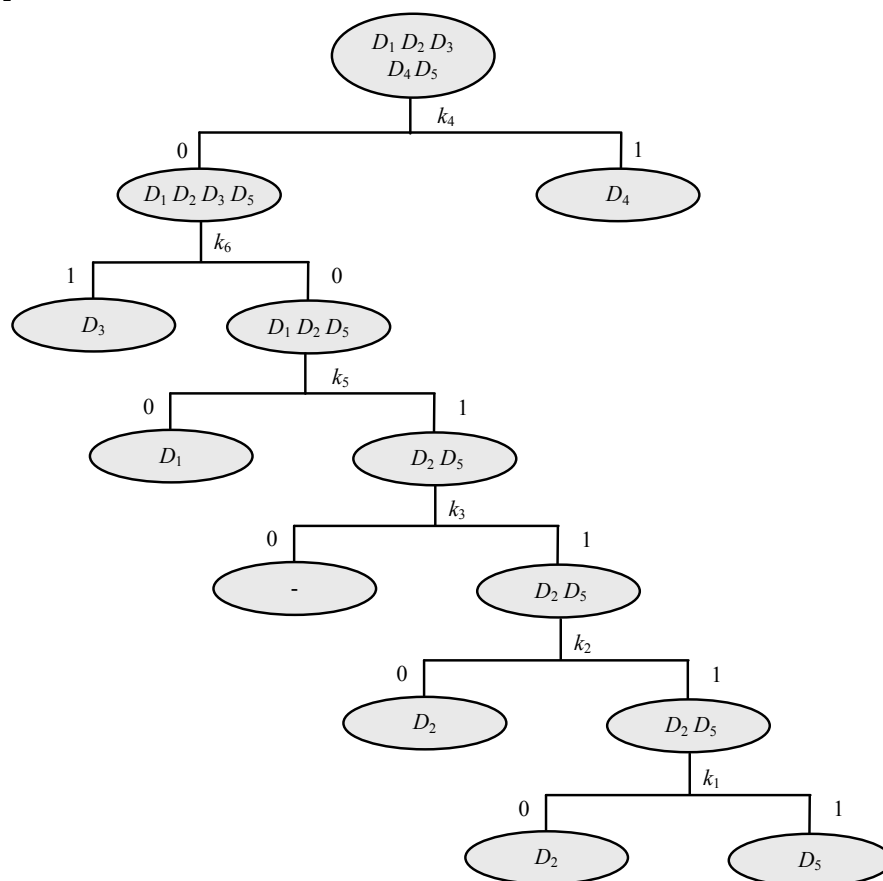


Рисунок 2 – Безусловный алгоритм диагностирования ТРЦ

Как видно из приведенного алгоритма, уже первая проверка по признаку k_4 может или сразу выявить диагноз $D4$, или исключить его. Дальнейшие проверки по признакам k_6 и k_5 аналогично могут выявить или исключить диагнозы $D3$ и $D1$ соответственно.

Недостатком условного алгоритма является то, что он не учитывает информацию, полученную на более ранних этапах проведения проверок. Исходя из этого недостатка в безусловном алгоритме, приведенном на рисунке 2, на четвертом шаге проводится необязательная проверка по признаку k_3 . Данная проверка имела существенную диагностическую ценность в исходных условиях (0,681), но после проверки по признаку k_5 не несет в себе никакой дополнительной информации.

Несмотря на указанные недостатки безусловного алгоритма для решения поставленной задачи он позволяет по крайней мере выявить, какой из диагностических признаков дает наибольшую ценность и, как следствие, уменьшить среднее время поиска отказа в исследуемой системе, заранее исключив неоправданные действия.

Более совершенным с точки зрения построения оптимальной последовательности проверок является условный алгоритм диагностирования [3], но он также требует большого коли-

чества вычислений. Построение условного алгоритма диагностирования для поставленной задачи будет рассмотрено в следующей статье.

Список литературы

1. Соколов, М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 124 – 132.
2. Филюшкина, Т. Напольному оборудованию – современные технологии [Текст] / Т. Филюшкина // Автоматика, связь и информатика. – М., 2010. – № 9. – С. 2 – 6.
3. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики: Учебное пособие [Текст] / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников / УМЦ ЖДТ. – М., 2004. – 318 с.
4. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных дорог: Справочник [Текст] / В. С. Аркатов. – М.: Миссия-М, 2006. – 496 с.
5. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки [Текст] / ОАО «РЖД», – М. 2015. – 129 с.
6. Сороко, В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: В 4 кн. [Текст] / В. И. Сороко, Ж. В. Фоткина. – М.: ПЛАНЕТА, 2013. – Кн. 1. – 1060 с.
7. Аюпов, Р. Ш. Синтез системы пропуска обратного тягового тока в электротехническом комплексе электроснабжения железных дорог [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Аюпов Роман Шамильевич. – Омск, 2009. – 19 с.
8. Иванова, Е. Г. Построение алгоритма проверки технического состояния устройств числовой кодовой автоблокировки [Текст] / Е. Г. Иванова, Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, на производстве и транспорте-2010». – Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 1. – С. 58 – 63.
9. Ларионов, Г. В. Построение алгоритмов диагностирования аппаратуры числовой кодовой автоблокировки на основе информационной ценности признаков [Текст] / Г. В. Ларионов, С. Л. Лисин // Межвуз. темат. сб. науч. тр. «Эффективность и безопасность работы электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 32 – 38.
10. Соколов, М. М. Контроль состояния системы электроснабжения устройств железнодорожной автоматики: Монография [Текст] / М. М. Соколов // Lambert Academic Publishing. – Саарбрюккен, 2012. – 161 с.

References

1. Sokolov M. M. Improvement of technology service of station track circuits railway automation [Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya stancionnyh rel'sovyh cepej]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 124 – 132.
2. Filyushkina T. Outdoor equipment – modern technology [Napol'nomu oborudovaniyu - sovremennye tekhnologii]. *Avtomatika, svyaz', informatika – Journal*, 2010, no. 9 (2010), pp. 2 – 6.
3. Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki* (Basics of technical diagnostics). Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2004, 318 p.
4. Arkatov V. S. *Rel'sovye cipi magistral'nyh dorog* (Railways of main roads), Moscow: ООО «Missiia-M», 2006, 496 p.
5. *Instrukciya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki* (Instruction on maintenance and repair of devices and systems of signaling, centralization and blocking), Moscow, Railway Consulting Agency, 2015, 129 p.
6. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. *Apparatura zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* (Railway automation and telemechanics equipment). Moscow: ООО «NPF «ПЛАНЕТА» Publ, 2013, 1060 p.

7. Ajupov R. Sh. *Sintez sistemy propuska obratnogo tjagovogo toka v jelectrotehnicheskome komplekse jelectrosnabzhenija zheleznyh dorog* (Synthesis of reverse traction current transmission system in the electrical power complex of railroad power supply). Candidate's thesis, Omsk, OmsGTU, 2009. 19 p.

8. Ivanova E. G., Larionov G. V., Lisin S. L. Construction of an algorithm for checking the technical state of the devices of a numerical code lock [Postroenie algoritma proverki tehnikeskogo sostojanija ustrojstv chislovoj kodovoj avtoblokirovki]. *Abstracts of the Int. conference «Perspective Innovations in Science, Education, Production and Transport-2010»*. Odessa, 2010. T. 1, pp. 58 – 63.

9. Larionov G. V., Lisin S. L. The construction of algorithms for diagnosing the hardware of a numerical code lock on the basis of the information value of the signs [Postroenie algoritmov diagnostirovanija apparatury chislovoj kodovoj avtoblokirovki na osnove informacionnoj cennosti priznakov]. *Journal «Efficiency and safety of operation of electrical systems and automation and telemechanics systems in railway transport»*. Omsk, 2011, pp. 32 – 38.

10. Sokolov M. M. *Monitoring the state of the power supply system for railway automation devices* (Kontrol' sostojanija sistemy jelectrosnabzhenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki). Saarbrücken; Lambert Academic Publishing, 2012, 161 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +8 (3812) 311872.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Построение безусловного алгоритма диагностирования станционных рельсовых цепей тональной частоты [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1(33). – С 139 – 145.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M. Construction of unconditional algorithm for diagnostics of tonal rail circuits on station. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 33, no 1, pp. 139 – 145 (In Russian).

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 представляется:

рукопись 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;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, affiliation (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую 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 в себя 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 на русском языке (по центру, 12 пт), affiliation авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), affiliation авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском 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, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

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* (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 статьи 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.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 1 (33) 2018

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 СМИ ПИ № ФС77-71514 от 1 ноября 2017 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

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.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.03.2018.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 28.03.2018.

