

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(36)

2018

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – профессор кафедры «Мосты» 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 – ректор 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. Cherepishin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokaryov Sergey Alexandrovich – professor of the department «Bridges» 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 Yury 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. Kargapolitcey Sergey Konstantinovich – 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 KazATC, 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).

Заваренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Голубков А. С., Ермачков Г. Р., Митрофанов А. Н. Увеличение ресурса токоёмных устройств за счет выбора рациональных сочетаний участковой скорости электроподвижного состава и параметров системы токосъема 2
- Муравьев Д. В., Рауба А. А. Комплексная экспертиза изломов крепежных деталей подвижного состава методами металлографического анализа 10
- Панов К. В. Разработка имитационной модели деповского ремонта локомотивов, учитывающей вероятность возникновения неплановых технологических операций 21
- Плаксин А. В., Швецов С. В. Пути повышения энергетической эффективности эксплуатируемых пассажирских электропоездов 31
- Семенов А. П., Лакин И. К. Исследование эффективности эксплуатации локомотивов 41
- Шантаренко С. Г., Кузнецов В. Ф., Тараненко В. А. Математическое моделирование силовых полей в элементах колесно-моторного блока электропоезда серии 2ЭС10 53
- Якубов М. С., Мухамедова З. Г. Анализ и оценка энергетической эффективности специального самоходного подвижного состава железной дороги 60

Транспортная энергетика

- Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок 69
- Кандаев В. А., Елизарова Ю. М., Авдеева К. В., Якуничихина Н. К. Автоматизация расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния 76
- Кондратьев Ю. В., Квашук В. А., Хусаинов Е. К. Обеспечение защиты контактной сети постоянного тока при вынужденных режимах 87
- Третьяков Е. А., Головнев Г. Е. Определение воздействий в интеллектуальной системе управления напряжением в распределительных электрических сетях 95
- Шурова Н. К. Усиление системы тягового электроснабжения переменного тока применением компенсирующих устройств в условиях пропуска поездов повышенной массы 106

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Альтман Е. А., Елизаров Д. А., Александров А. В. Совершенствование вычислительных процедур анализа сигналов тяговой электрической сети 113
- Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Васеева Т. В. Повышение эффективности информационно-измерительного комплекса автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии 120
- Митрохин В. Е., Занкин С. Н. Экспериментальная проверка адекватности модели коаксиального кабеля в широком диапазоне частот 132
- Сидорова Е. А., Железняк С. П., Подгорная С. О. Управление энергопотреблением на тягу поездов за счет повышения эффективности функционирования автоматизированной системы обработки информации об энергозатратах локомотивов 142

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 004.032.26: УДК 621.332

А. С. Голубков¹, Г. Р. Ермачков¹, А. Н. Митрофанов²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ УЧАСТКОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА

***Аннотация.** Предложен способ выбора рациональных сочетаний скорости электроподвижного состава по условиям максимального пробега при заданном износе контактах вставок токоприемника и регулировки подвески контактной сети действующих и проектируемых участков электроснабжения. Рассмотрен принцип работы и функциональные возможности программного обеспечения для ЭВМ «Программа для моделирования контактного нажатия с помощью нелинейной авторегрессионной нейронной сети с экзогенными входами».*

***Ключевые слова:** контактная сеть, токоприемник, износ, нейронная сеть, контактное нажатие, прогнозирование.*

Anton S. Golubkov¹, Gleb R. Ermachkov¹, Alexander N. Mitrofanov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

INCREASE OF THE RESOURCE OF CURRENT COLLECTORS BY THE MEANS OF CHOICE RATIONAL COMBINATIONS OF THE SECTIONAL SPEED OF ELECTRICAL TRAINS AND PARAMETERS OF THE CURRENT COLLECTION SYSTEM

***Annotation.** Proposed method for choice rational combinations of the sectional speed of an electric rolling stock under the terms of the maximum mileage with preset wear of current collector stripes and the adjustment of the catenary of existing and projected sections of power supply. The principle of operation and functionality of computer software "Program for the simulation of contact force using a nonlinear autoregressive neural network with exogenous inputs" is considered.*

***Keywords:** catenary, current collector, wear, neural network, contact pressure, prediction.*

Каждый год разрабатываются новые методы и технологии для повышения скоростей движения электроподвижного состава (ЭПС). С увеличением скорости процесс передачи электрической энергии ухудшается, растет износ контактных элементов токоприемника и подвески контактной сети (ПКС), увеличивается вероятность повреждения элементов, участвующих в этом процессе. Дефекты, возникающие при взаимодействии токоприемника с ПКС, могут привести к возникновению дуги и в конечном итоге к разрыву контактного провода. Несмотря на незначительное количество случаев выхода из строя по сравнению с количеством поездов в обращении каждый инцидент наносит огромный ущерб железной дороге и может быть связан с человеческими жизнями. В связи с этим моделирование взаимодействия пары «Токоприемник – ПКС» с целью выявления предполагаемых мест дефекта и прогнозирования износа контактных элементов является актуальной задачей.

Во многих научных центрах и исследовательских подразделениях ведущих железнодорожных организаций ведутся исследования, направленные на повышение эффективности передачи электрической энергии в скользящем контакте, определение оптимальных участковых скоростей и расчет износа контактных элементов [1 – 9].

Задачей исследования является увеличение ресурса токосъемных устройств за счет выбора рациональных сочетаний участковой скорости ЭПС и параметров системы токосъема.

Наиболее информативным фактором, характеризующим процесс взаимодействия пары «Токоприемник – ПКС», является мгновенное значение контактного нажатия токоприемника на контактный провод ($P_{кт}$). Массив данных $P_{кт}$ позволяет провести анализ эффективности регулировки ПКС, рассчитать износ контактных элементов токоприемника, определить оптимальное среднее контактное нажатие и оптимальную скорость движения ЭПС.

Для решения поставленной задачи разработано программное обеспечение для ЭВМ «Программа для моделирования контактного нажатия с помощью нелинейной авторегрессионной нейронной сети с экзогенными входами» (ПО).

ПО позволяет моделировать процесс взаимодействия токоприемника с контактным проводом, рассчитывая $P_{кт}$. Основой данного ПО являются алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС) для моделирования процесса с наименьшим числом необоснованных допущений. Данный факт позволяет упростить модель, не снижая ее эффективности, что позволяет использовать меньше вычислительных ресурсов в отличие от других способов [3 – 6]. Наличие обратной связи позволяет учитывать предысторию состояния динамического объекта.

Для моделирования контактного нажатия ИНС использует в расчетах только ту информацию, которая подается на ее вход. От полноты подаваемой информации зависит точность результата выполненной работы. Установлено [7, 8], что на исследуемый процесс влияют следующие факторы:

- зигзаг контактного провода (z);
- расположение контактных проводов в вертикальной плоскости без контактного нажатия (h_n);
- эластичность контактного провода (η);
- скорость движения ЭПС (U).

Данные об изменении указанных величин подаются на внешние входы ИНС. После выбора входных параметров архитектура сети настраивается, обучается и тестируется по критерию наименьшей ошибки [9].

На начальном этапе работы ПО производится обучение ИНС по выбранной архитектуре с использованием файла, содержащего 40 000 отсчетов экспериментальных данных. Файл для обучения содержит следующие данные: z , h_n , η , U и $P_{кт}$. Параметры обучения определяются в соответствии с описанной методикой [9]. Выходной вектор с данными о $P_{кт}$, полученными на модели, генерируется длиной соответствующей количеству столбцов входной матрицы за вычетом длин линий задержек. После обучения и сохранения настроенной конфигурации ИНС может использоваться для моделирования $P_{кт}$ на тестовом участке. Для этого необходимо загрузить входную матрицу данных участка в виде файла, содержащего z , h_n , η и U .

Ошибка моделирования ε_i рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_i = (P_{кт} - P_{кт(мод)i}), \quad (1)$$

где i – номер отсчета;

$P_{кт(мод)i}$ – модельное мгновенное значение контактного нажатия токоприемника на контактный провод.

Для оценки достоверности модельных данных использованы экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний системы токосъема на скоростном испытательном участке Белореченск – Майкоп (2012 г.) (рисунки 1).

Средняя относительная ошибка моделирования (A) рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{\varepsilon_i}{P_{\text{кт(мод)}i}} \right| \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где n – количество отсчетов.

Полученная архитектура ИНС демонстрирует среднюю относительную ошибку менее 5 % на тестовом участке (рисунок 2).

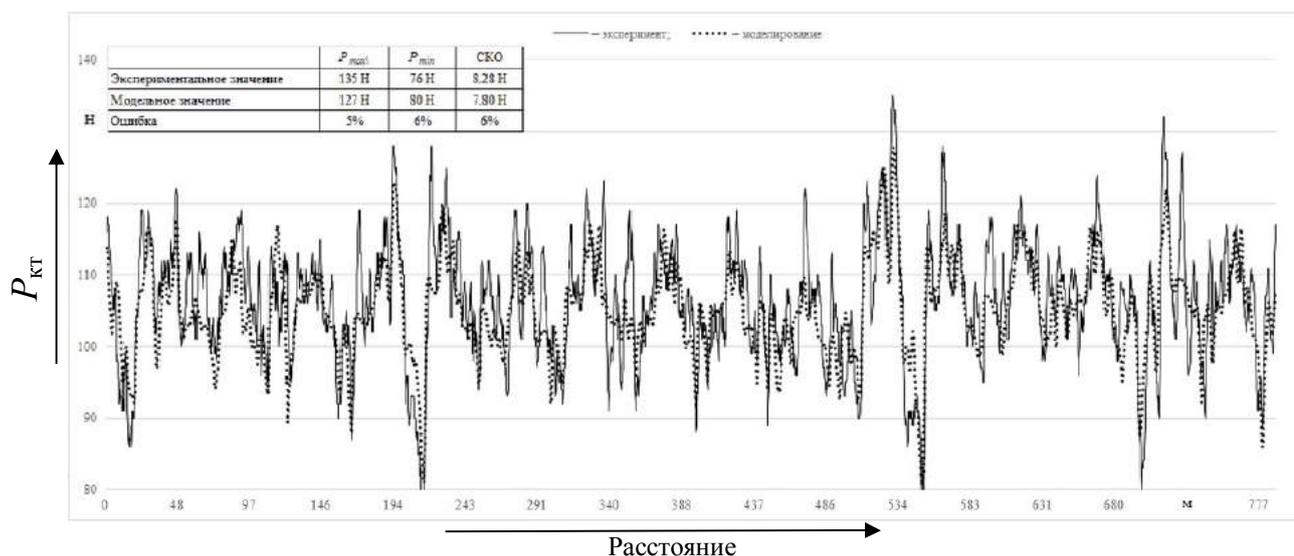


Рисунок 1 – Сравнение показателей экспериментальных и модельных $P_{\text{кт}}$

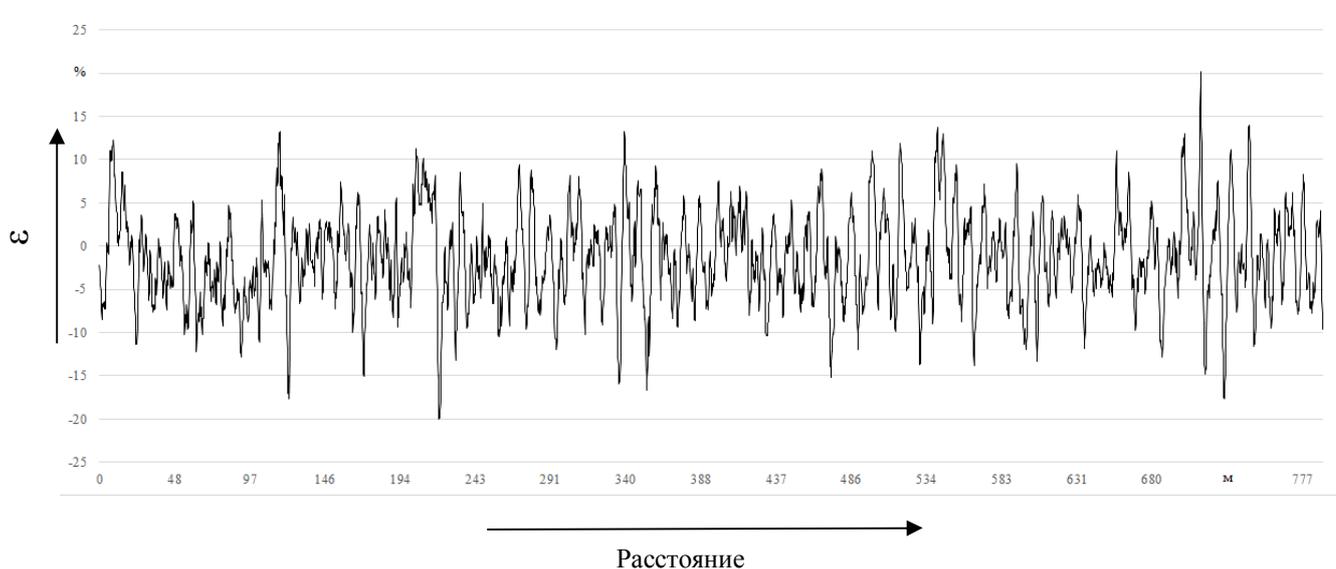


Рисунок 2 – Мгновенные значения ошибки моделирования при использовании NARX-сети

Для проверки качества моделирования строится гистограмма распределения модельных и экспериментальных $P_{\text{кт}}$ по вероятности попадания значений в пределах границ интервалов (рисунок 3). Оптимальное число интервалов (k) для гистограммы распределения, рассчитанное по формуле Старджесса [10], составляет 10.

Несмотря на наличие расхождений между экспериментальными и модельными $P_{\text{кт}}$ на основании полученной гистограммы и рассчитанной ошибки моделирования можно сделать вывод о том, что основные статистические показатели соответствуют экспериментальным

данным, что дает возможность использовать полученные результаты для расчета износа контактных элементов токоприемника.

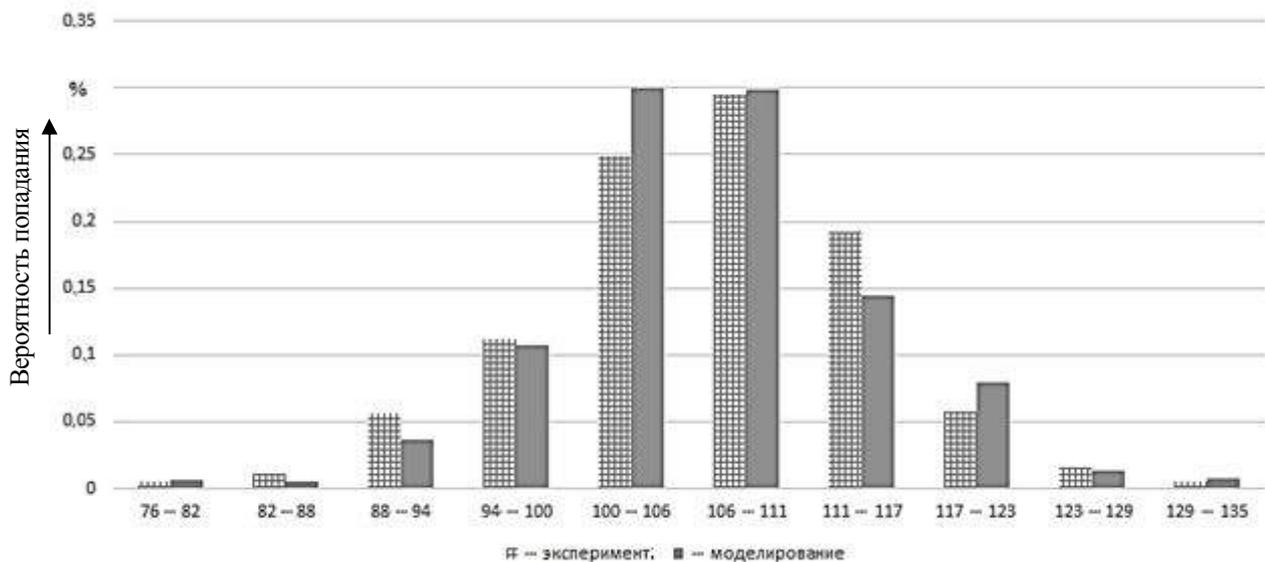


Рисунок 3 – Гистограмма распределения $P_{кт}$ по вероятности попадания значений в пределах границ интервалов

После определения $P_{кт}$ ПО рассчитывает износ контактных элементов токоприемника по методике, предложенной профессором В. П. Михеевым [11]. По данной методике, имея U -образную зависимость удельного износа от контактного нажатия, предлагается рассчитать изнашивание по длине рассматриваемого участка. Предварительно U -образная зависимость аппроксимирована с помощью кусочно-нелинейной функции, позволяющей на каждом шаге расчета определять значения удельного износа (рисунок 4).

$$j_i = \begin{cases} (0,0001 \cdot (P_{кт(мод)i})^{1,6875}; & 40 < P_{кт(мод)i} \leq 100; \\ (0,0011 \cdot (P_{кт(мод)i})^2 - 0,2244 \cdot P_{кт(мод)i} + 11,9703); & 100 < P_{кт(мод)i} < 300, \end{cases} \quad (3)$$

$$J = \sum_{i=1}^n j_i \cdot l_i, \quad (4)$$

где j – удельный износ, $\text{мм}^3/\text{м}$;

l – длина участка на рассматриваемом отсчете, м;

J – суммарный износ, мм^3 .

Таким образом, по U -образной зависимости удельного износа от нажатия для заданного типа вставок полоза токоприемника и по геометрическим размерам полоза токоприемника можно спрогнозировать износ контактных вставок на заданном пробеге. Распределение износа по ширине полоза зависит от изменения расположения проводов в плане пути. Расчет износа контактных вставок токоприемника по длине участка позволяет установить места ПКС, на которых наблюдается повышенный износ (рисунок 5).

Для определения наилучшей конфигурации регулировок ПКС созданы матрицы с исходными данными для трех вариантов регулировок, где в качестве z и η использованы экспериментально полученные данные. Вместо экспериментальных данных h_n были использованы расчетные ($h_{n(\text{расч})}$), которые задавались синусоидой с различными амплитудами для каждого из вариантов, имитирующими стрелу провеса. Среднее значение $h_{n(\text{расч})}$ в каждом из вариантов одинаково и равно среднему h_n . Каждый вариант регулировок рассмотрен при различных скоростных режимах, при этом скорость движения ЭПС на протяжении всего участка задана постоянной. Полученные исходные данные подаются на обученную ИНС. В результате ра-

боты ПО рассчитываются показатели контактного нажатия и общий износ контактных вставок при пробеге 60 000 км. В качестве показателей контактного нажатия рассмотрены максимальное и минимальное значения нажатия (P_{max} , P_{min}) и разброс нажатия (ΔP). Результаты сведены в таблицу.

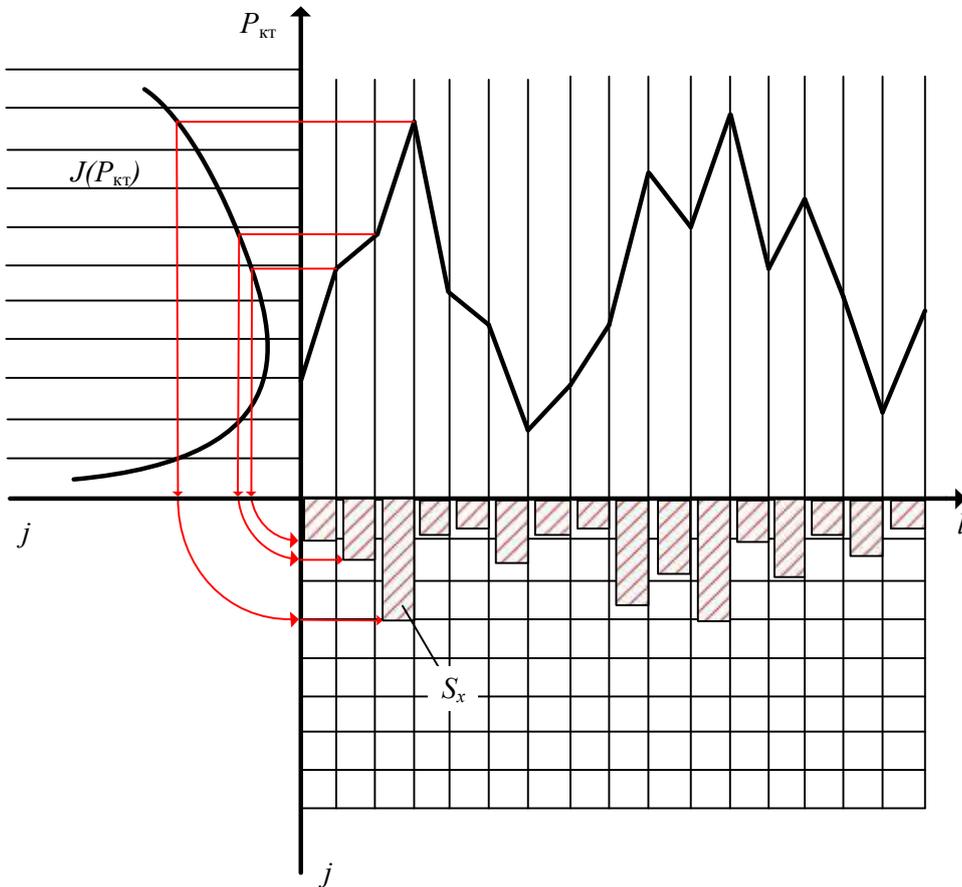


Рисунок 4 – Определение износа контактных элементов токоприемника по $P_{кТ}$

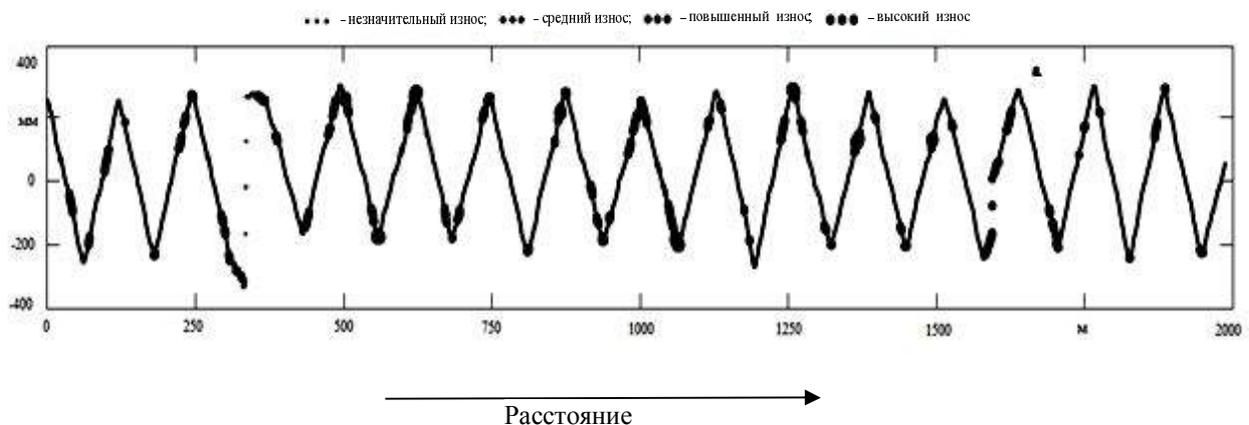


Рисунок 5 – Интенсивность износа контактных вставок токоприемника по длине перегона (фрагмент)

В результате анализа данных таблицы можно отметить, что наибольший износ вставок токоприемника приходится на ПКС с отрицательной стрелой провеса. С повышением скорости минимальный износ смещается с нулевой стрелы провеса в сторону положительной. При положительной стреле провеса установлено улучшение статистических показателей контактного нажатия с увеличением скорости в сравнении с другими вариантами регулировок.

Показатели износа и контактного нажатия для различных стрел провеса ПКС и скорости движения ЭПС

Скорость, м/с	Стрела провеса, мм	P_{\max} , Н	P_{\min} , Н	ΔP , Н	Общий износ контактных вставок, мм ³
33	80	149	84	65	302 578
	0	147	85	62	285 364
	-80	152	85	67	320 556
66	80	215	108	107	432 786
	0	210	114	96	426 982
	-80	220	103	117	463 245
99	80	281	165	116	835 216
	0	286	160	126	838 482
	-80	295	150	145	925 895

Разработанное ПО позволяет выполнить качественный анализ влияния изменения стрелы провеса ПКС на износ контактных вставок токоприемника и в зависимости от скорости движения ЭПС рекомендовать стрелу провеса, при которой износ будет минимальным. При отсутствии возможности регулировки ПКС на основании полученных результатов ПО можно рекомендовать допустимые скоростные режимы и оптимальное среднее контактное нажатие токоприемника на участке по условиям допустимого износа контактных вставок токоприемника.

Таким образом, ПО позволяет увеличивать ресурс токосъемных устройств за счет выбора рациональных сочетаний участковой скорости ЭПС и параметров системы токосъема. Кроме того, результаты работы ПО могут быть использованы для регулировки статического нажатия токоприемника в зависимости от скорости движения ЭПС и путевой координаты.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Расчет интегральных показателей качества токосъема с помощью ассоциативных экспертных нейронных сетей [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 3 (7). – С. 33 – 43.
2. 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.
3. Голубков, А. С. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвески 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. – С. 30 – 37.
4. 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.

5. Zhigang L, Song Y, Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary. *Journal of Modern Transportation*, 2018, no. 26(1), pp. 1 – 23.

6. L.-M. Cleon, A. Bobillot, J.-P. Mentel, E. Aziz, OSCAR: La caténaire en 3D, *In Revue Générale des Chemins de Fer*, 2006, p. 155.

7. Ермачков, Г. Р. Применение нейронных сетей для моделирования взаимодействия контактной подвески и токоприемника [Текст] / Г. Р. Ермачков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Материалы XLII междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» / Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы, 2018. – С. 66 – 72.

8. 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 / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – М. – 2013. – № 2 (66). – С. 104 – 121.

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

10. Sturges H. A. The choice of classic intervals, *J. Am. Statist. Assoc.*, 1926. p. 47.

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

References

1. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Calculation of integral indicators of the quality of current collection with the help of associative expert neural networks [Raschet integral'nykh pokazateley kachestva tokos'yema s pomoshch'yu assotsiativnykh ekspertnykh neyronnykh setey]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2011, no. 3 (7), pp. 33 – 43.

2. 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 [Primeneniye tsifrovyyh sredstv izmereniya dlja opredeleniya dinamicheskikh harakteristik ustrojstv tokos'yema]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2007, no. 4, pp. 76 – 79.

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 volnovyyh protsessov v kontaktnoy podveske na osnove konechno-elementnoy modeli]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no 1, pp. 30 – 37.

4. Kudryashov E. V. Information support of the life cycle of the contact network based on the finite element mathematical model [Informacionnoe soprovozhdenie zhiznennogo tsikla kontaktnoy seti na osnove konechno-elementnoy matematicheskoy modeli]. *Sb. nauch. trudov OAO «VNIIZHT» «Tokos'em i tyagovoe ehlektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke»* (Sat. sci. works of JSC VNIIZhT «Current-acquisition and traction power supply in high-speed DC motion»). Moscow: Intetext, 2010, pp. 52 – 66.

5. Zhigang L, Song Y, Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary, *Journal of Modern Transportation*, 2018, no. 26(1), pp. 1 – 23.

6. L.-M. Cleon, A. Bobillot, J.-P. Mentel, E. Aziz, OSCAR: La caténaire en 3D, *In Revue Générale des Chemins de Fer*, 2006, p. 155.

7. Ermachkov, G. R., Smerdin A. N., Golubkov A. S. Use of neural networks for modeling the interaction of a contact suspension and current collector [Primeneniye neyronnykh setey dlya modelirovaniya vzaimodeystviya kontaktnoy podveski i tokopriyemnika] *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Innovatsionnyye tekhnologii na transporte: obrazovaniye, nauka, praktika»*

(Abstracts of the Int. conference «Innovative technologies in transport: education, science, practice»). Almaty, 2018, pp. 66 – 72.

8. Meshherjakov V. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. The prerequisites for obtaining statistically reliable data in the simulation of the current collection simulation [Predposylki poluchenija statisticheski dostovernih dannyh v hode imitacionnogo modelirovanija tokos"ema]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta el-ektrovo-zostroeniia* (Vestnik of the All-Russian Scientific Research and Design-Design Institute of Electric Locomotive Building). 2013, no. 2 (66), pp. 104 – 121.

9. Ermachchkov G. R., Sidorov O. A., Golubkov A. S., Smerdin A. N. The use of neural networks in modeling a current collection system on electric railways [Primeneniye neyronnykh setey pri modelirovanii sistemy tokos"yema na elektricheskikh zheleznykh dorogakh] *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1(33), pp. 69 – 79.

10. Sturges H. A. The choice of classic intervals, *J. Am. Statist. Assoc.*, 1926. p. 47.

11. Mikheev V. P. Contact networks and power lines. Moscow: Route, 2003, 416 p.

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 «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 железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com

Митрофанов Александр Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института энергоэффективности транспорта, СамГУПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Голубков, А. С. Увеличение ресурса токосъемных устройств за счет выбора рациональных сочетаний участковой скорости электроподвижного состава и параметров системы токосъема [Текст] / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, А. Н. Митрофанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 2 – 9.

INFORMATION ABOUT 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.

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.

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

Mitrofanov Alexander Nikolaevich

Samara State Transport University (SSTU).

2V, Svobody St., Samara, 443066, Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Research Institute for Energy Efficiency of Transport, SSTU.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Golubkov A. S., Yermachkov G. R., Mitrofanov A. N. Increase of the resource of current collectors by the means of choice rational combinations of the sectional speed of electrical trains and parameters of the current collection system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 2 – 9 (In Russian).

УДК 620.178.152:620.184.6

Д. В. Муравьев, А. А. Рауба

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

КОМПЛЕКСНАЯ ЭКСПЕРТИЗА ИЗЛОМОВ КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТОДАМИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Аннотация. Статья посвящена анализу качества материалов для изготовления крепежных деталей подвижного состава. В работе представлены результаты исследований разрушенных в процессе эксплуатации деталей, используемых для крепления узлов ходовой части, рессорного подвешивания и ударно-тяговых устройств подвижного состава. Цель работы заключается в установлении вероятных причин разрушения деталей под действием статических и динамических нагрузок при движении по рельсовому пути. В работе описываются методология и последовательность проведения экспертизы материалов на основе анализа химического состава металлов, оценки механических свойств и изучения поверхностей изломов деталей. Представлены результаты спектрального анализа металла исследуемых деталей, измерения твердости и анализа поверхности изломов деталей, которые позволили установить возможные характер, последовательность и причины их разрушения. Полученные в ходе исследований результаты показали, что основной причиной изломов крепежных деталей подвижного состава является воздействие на них нагрузок, превышающих предел прочности металла. При этом установлено, что марка применяемого в производстве металла не соответствует требованиям нормативно-технической документации на изделие и не предназначена для изготовления крепежных деталей. Таким образом, полученные выводы подтверждают необходимость ужесточения контроля качества материалов, применяемых при производстве крепежных деталей подвижного состава, и могут использоваться на машиностроительных предприятиях, специализирующихся на производстве комплектующих и запасных частей для железнодорожного подвижного состава. Основной вывод работы заключается в необходимости использования при производстве деталей крепления ответственных узлов и агрегатов подвижного состава конструктивно обоснованных марок сталей и сплавов.

Ключевые слова: дефект, излом, разрушение, качество, материал, эксплуатация, анализ, твердость, сталь.

Dmitry V. Muraviev, Aleksandr A. Rauba

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

COMPLEX EXAMINATION OF BREACHES OF FASTENING PARTS OF ROLLING STOCK BY METAL-GRAPHIC ANALYSIS METHODS

Abstract. The article is devoted to the analysis of the quality of materials for the manufacture of fasteners for rolling stock. The paper presents the results of studies of parts destroyed during operation that are used for fastening the undercarriage assemblies, spring suspension and impact-traction devices of rolling stock. The purpose of the work is to establish the probable causes of the destruction of parts under the action of static and dynamic loads during movement on the track. The paper describes the methodology and sequence of examination of materials based on the analysis of the chemical composition of metals, the assessment of mechanical properties and the study of the surfaces of fractures of parts. The results of spectral analysis of the metal of the investigated parts, measurements of hardness and analysis of the surface of fractures of the parts are presented, which allowed to establish the possible nature, sequence and causes of their destruction. The results obtained in the course of the research showed that the main reason for the breaks in the fasteners of rolling stock is the impact on them of loads exceeding the tensile strength of the metal. It was found that the brand used in the production of metal does not meet the requirements of the normative-technical documentation for the product and is not intended for the manufacture of fasteners. Thus, the findings confirm the need to tighten the quality control of materials used in the manufacture of fasteners for rolling stock, and can be used in machine-building enterprises specializing in the production of components and spare parts for railway rolling stock. The main conclusion of the work is the need to use in the production of fastening parts of the responsible components and assemblies of rolling stock, structurally reasonable steels and alloys.

Keywords: defect, fracture, destruction, quality, material, operation, analysis, hardness, steel.

Анализ статистических данных по дефектам, разрушениям и повреждениям крепежных деталей, которые применяются для фиксации узлов экипажной части, элементов рессорного

подвешивания и деталей автосцепного устройства подвижного состава, показал, что за последние два года на Западно-Сибирской железной дороге участились случаи катастрофического излома и разрушения крепежных болтов узлов и агрегатов вагонов и локомотивов в пути следования организованного поезда. Выявленные случаи приводили к падению незакрепленных деталей на рельсы и повреждению верхнего строения железнодорожного пути, остановке поездов, нарушению графиков их движения и т. д.

Установлено, что подобные дефекты могут приводить к следующим последствиям:

к нарушению динамических характеристик ходовой части подвижного состава в результате ослабления крепления узлов между собой и к кузову, что способствует повышению колебаний элементов, снижению скоростных показателей и общего КПД;

вероятности возникновения аварийных ситуаций в результате падения незакрепленных деталей на железнодорожные пути, что приводит к неплановым ремонтам подвижного состава, незапланированным расходам и угрозе безопасности движения в целом;

нарушению эффективности действия основных систем подвижного состава, а именно: тормозной системы, в результате ослабления крепления деталей тормозной рычажной передачи, системы гашения колебаний экипажной части, в результате ослабления крепления деталей рессорного подвешивания и системы автоматического сцепления единиц подвижного состава, в результате ослабления крепления деталей автосцепного устройства.

Таким образом, с целью установления возможных причин изломов крепежных деталей и предотвращения схожих по последствиям ситуаций в будущем была проведена научно-исследовательская работа по оценке качества и механических свойств материалов, используемых при изготовлении различных крепежных деталей подвижного состава.

Анализ априорной информации позволил установить, что основные причины возникновения подобных изломов можно условно разделить на три группы:

- 1) I группа – несоответствие химического состава и качества материалов для изготовления крепежных деталей требованиям нормативно-технической документации;
- 2) II группа – нарушение режимов и технологии изготовления и упрочнения крепежных деталей и, как следствие, ухудшение механических свойств материалов;
- 3) III группа – усталостные повреждения металла в процессе эксплуатации.

В рамках научно-исследовательской работы на базе испытательной лаборатории «Металловедение и структурный анализ металлов и сплавов» Омского государственного университета путей сообщения проводилась комплексная экспертиза качества материалов крепежных изделий подвижного состава, включающая в себя следующие этапы:

спектральный анализ химического состава металла исследуемых образцов разрушенных деталей на оптико-эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ» с целью определения марки материала детали и установления соответствия марки требованиям нормативно-технической документации на исследуемую крепежную деталь [1];

определение твердости металла в различных частях и сечениях исследуемых образцов для оценки эффективности термообработки металла при производстве деталей и обеспечения заданной твердости согласно требованиям нормативно-технической документации;

анализ поверхности изломов разрушенных деталей для определения вида излома, его характера, источника катастрофического разрушения с целью установления вероятных причин поломки крепежной детали [2].

Образцы деталей с изломами, поступившие с железнодорожных предприятий в период с мая 2017 г. по ноябрь 2018 г., прошли комплексную экспертизу в соответствии с описанным порядком. Среди деталей, повреждения которых серьезно повлияли на безопасность движения, можно выделить следующие: болт М12 крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-П, болт М16×240 крепления поводка тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-П, болты крепления ударной розетки автосцепного устройства укладочного крана УК-25/9-18.

Болт М12 крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II исследовался на соответствие требованиям сертификата качества № 413Г01. В рамках данного исследования был проведен спектральный анализ образца металла болта, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа химического состава материала болта М12

Образец	Дата	Время	C	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	As
№1	15.05.17	20:01:13	0,129	0,241	0,011	0,019	0,065	0,471	0,125	0,203	0,009

Результаты соответствия исследуемой марки стали болта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта М12

Элемент	Болт крепления стопорной планки (образец №1)	10, ГОСТ 1050-2013	15, ГОСТ 1050-2013	20, ГОСТ 1050-2013
C	0,130	0,0700 – 0,1400	0,1200 – 0,1900	0,1700 – 0,2400
Si	0,241	0,1700 – 0,3700	0,1700 – 0,3700	0,1700 – 0,3700
Mn	0,471	0,3500 – 0,6500	0,3500 – 0,6500	0,3500 – 0,6500
S	0,019	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
P	0,011	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0350
Cr	0,065	0,0000 – 0,1500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
Ni	0,125	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
Cu	0,203	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500	0,0000 – 0,2500
As	0,009	0,0000 – 0,0800	0,0000 – 0,0800	0,0000 – 0,0800

Механические испытания материала рабочей (резьбовой) части болта включали в себя измерение твердости образца по методу Роквелла по шкале *HRB* согласно требованиям сертификата качества № 413Г01. Измерения выполнялись на поверхности поперечного среза резьбовой части болта на расстоянии $5 \pm 0,1$ мм от головки болта (рисунок 1). Полученные значения твердости приведены в таблице 3.

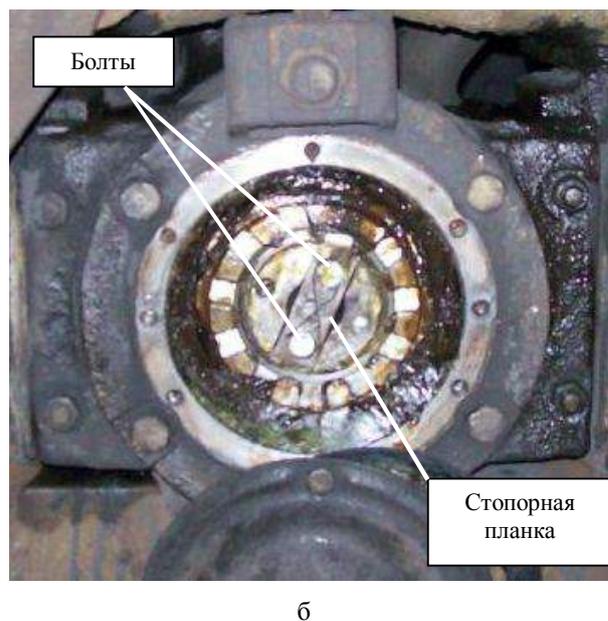
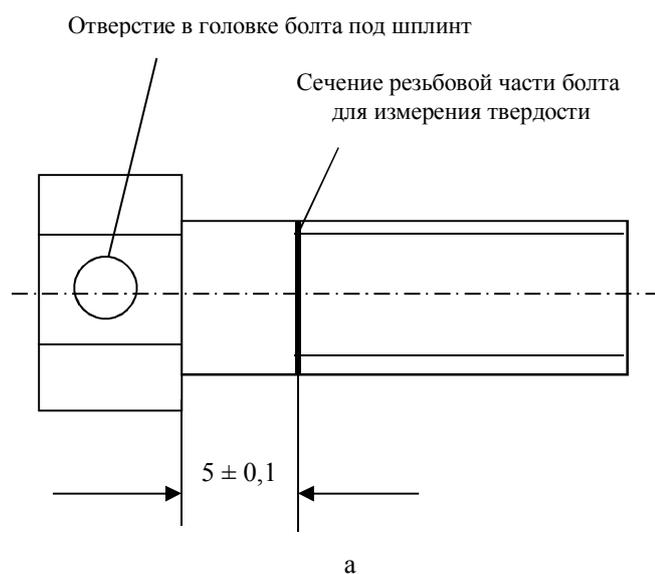


Рисунок 1 – Болт крепления стопорной планки корончатой гайки М110×4 буксы тележки пассажирского вагона типа КВЗ-ЦНИИ-II: а – схема вырезки образца для измерения твердости; б – схема крепления болтами стопорной планки гайки на оси РУ1

Таблица 3 – Значения твердости исследуемого материала болта М12

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Среднее значение
Значение твердости, HRB	95,6	96,4	95,2	96,1	97,3	97,3	96,4	96,6	96,9	96,6	96,8	96,47

Установлено, что среднее значение твердости по результатам 11 измерений составило 96,47 HRB, что превышает пределы допустимых значений твердости 91 – 96 HRB, указанные в сертификате качества № 413Г01. Кроме того, было проведено измерение твердости материала головки болта в месте излома, результаты которого представлены на рисунке 2.

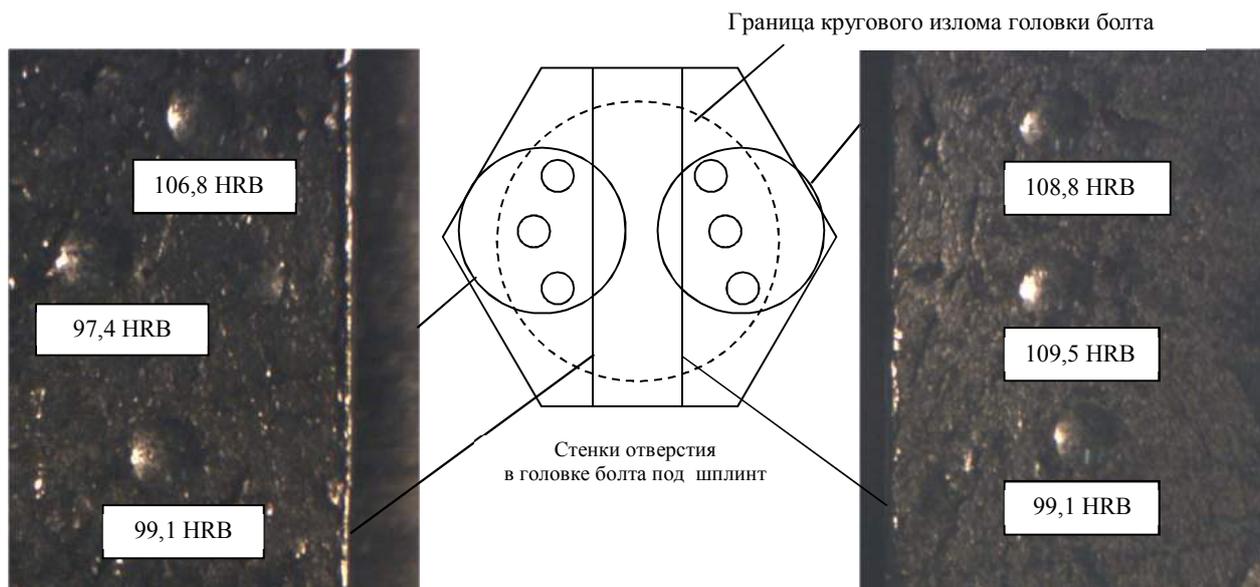


Рисунок 2 – Места определения твердости по поверхности излома головки болта

Проведенный анализ качества материала болта позволил получить следующие выводы относительно возможной причины разрушения исследованной детали.

1) Установлено, что марка материала болта в большей степени соответствует низкоуглеродистой стали 10, которая отличается от заявленной в сертификате качества № 413Г01 марки стали 20. Известно, что сталь 10 имеет значение временного сопротивления разрыву после нормализации 330 Н/мм^2 , в то время как сталь 20 – 410 Н/мм^2 [3].

2) Полученные значения твердости показали, что в границах кругового излома головки болта (см. рисунок 2) твердость существенно превышает допустимые пределы (91 – 96 HRB) и имеет максимальное значение 109,5 HRB, а следовательно, материал обладал повышенной хрупкостью, что, вероятно, и явилось причиной катастрофического разрушения болта.

3) Кристаллический характер излома (см. рисунок 2), четкая круговая граница излома, радиальная направленность зернистой структуры и расслоения по границам зерен свидетельствуют о нечеткой структуре материала и хрупком разрушении головки болта [4].

Таким образом, предполагаемой причиной хрупкого разрушения головки болта по шплинтовой отверстию, которое сыграло роль концентратора напряжений в материале, явилось воздействие на деталь нагрузки, превысившей предел прочности конструктивно необоснованной стали 10, при условии повышенной твердости металла болта.

В соответствии с установленным порядком определение марки материала стопорного болта М16×240 (К-0493.00.00.009) поводка тележки пассажирского вагона также основывалось на проведении спектрального анализа металла болта по аналитической методике «Стали низко- и среднелегированные» на оптико-эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ», результаты которого приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа химического состава материала болта М16×240

Образец	C	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	As
Болт стопорный М16×240 К-0493.00.00.009	0,214	0,292	0,008	0,004	0,024	0,484	0,029	0,06	0,001

Результаты соответствия материала стопорного болта различным маркам сталей представлены в отчете сортировки в таблице 5.

Таблица 5 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта М16×240

Элемент	Болт стопорный М16×240 (К-0493.00.00.009)	Ст4сп, ГОСТ 380-2005	20, ГОСТ 1050-2013
C	0,214	0,1800 – 0,2700	0,1700 – 0,2400
Si	0,292	0,1500 – 0,3000	0,1700 – 0,3700
Mn	0,484	0,4000 – 0,7000	0,3500 – 0,6500
S	0,004	0,0000 – 0,0500	0,0000 – 0,0400
P	0,008	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0350
Cr	0,024	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
Ni	0,029	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
Cu	0,06	0,0000 – 0,3000	0,0000 – 0,2500
As	0,001	–	0,0000 – 0,0800

Определение твердости материала стопорного болта М16×240 проводилось по методам Роквелла по шкале *HRB* и Бринелля по шкале *HB* в соответствии с требованиями ГОСТ 1050-2013 и показало результаты, приведенные в таблице 6 [5]. Значения твердости указаны в соответствии с местами измерений в резьбовой части, представленными на рисунке 3.

Таблица 6 – Значения твердости материала болта М16×240 в контрольных точках

Номер контрольной точки определения твердости	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значение твердости по Роквеллу, <i>HRB</i>	86,5	87,3	86,3	88,0	81,4	86,0	83,9	83,9	84,7
Значение твердости по Бринеллю, <i>HB</i>	171	174	170	177	154	170	162	162	165

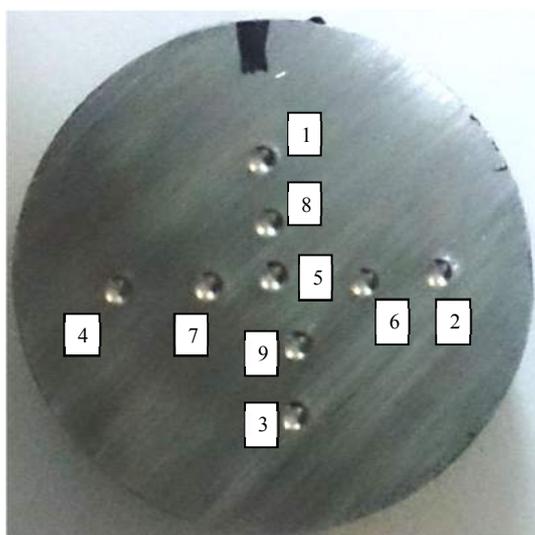


Рисунок 3 – Расположение контрольных точек определения твердости по сечению резьбовой части стопорного болта М16×240 поводка тележки пассажирского вагона

Установлено, что среднее значение твердости по результатам девяти измерений составило 85,33 *HRB*, что соответствует твердости по шкале Бринелля – 165 – 166 *HB* [6].

В ходе проведенных исследований качества материала болта получены выводы:

1) спектральный анализ образца стопорного болта показал соответствие исследуемого материала углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества Ст4сп, которая предназначена для изготовления профильных металлоконструкций, и углеродистой конструкционной качественной стали 20 для производства метизов (см. таблицу 5);

2) установлено, что твердость материала болта согласно данным таблицы 6 варьируется в пределах 81,4 – 88,0 *HRB* (154 – 177 *HB*) и в контрольных точках № 1 – 4, № 6 и № 9 превышает на 4,1 – 7,9 % предельно допустимые значения твердости 163 *HB* по ГОСТ 1050-2013 для горячекатаного и кованного или калиброванного отожженного проката из стали 20 [7]. Механические испытания показали, что отделочная обработка поверхности прутка не проводилась, поскольку твердость стали ниже твердости нагартованного прутка 207 *HB*.

Таким образом, вероятной причиной поломки стопорного болта явилось воздействие на него нагрузки, превысившей предел прочности стали Ст4сп, не предназначенной для изготовления крепежных деталей. Если же предположить, что болт был изготовлен из стали 20 (см. таблицу 5), то в этом случае отсутствие упрочнения в условиях повышенной твердости стали могло послужить причиной снижения прочности и разрушения болта под нагрузкой.

Разрушение болтов крепления ударной розетки к концевой балке рамы укладочного рельсового крана УК-25/9-18 привело к падению автосцепного устройства на путь и возникновению аварийной ситуации с угрозой безопасности движения. Болты с изломами, располагавшиеся относительно рамы укладочного крана и ударной розетки согласно схеме на рисунке 4, поступили в лабораторию для установления вероятных причин разрушения.

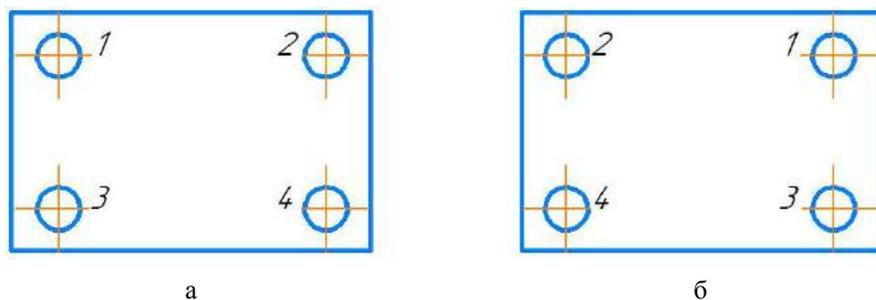


Рисунок 4 – Условная схема расположения исследуемых болтов крепления автосцепного устройства: а – ударная розетка (вид с обратной стороны); б – концевая балка

Визуальный осмотр исследуемых болтов позволил установить, что правые верхний и нижний болты № 1 и № 3 имеют изломы у основания головки, левый верхний болт № 2 получил двойной излом у основания головки и в резьбовой части, а болт № 4 – излом в резьбовой части со следами пластической деформации металла при скручивании (рисунок 5).

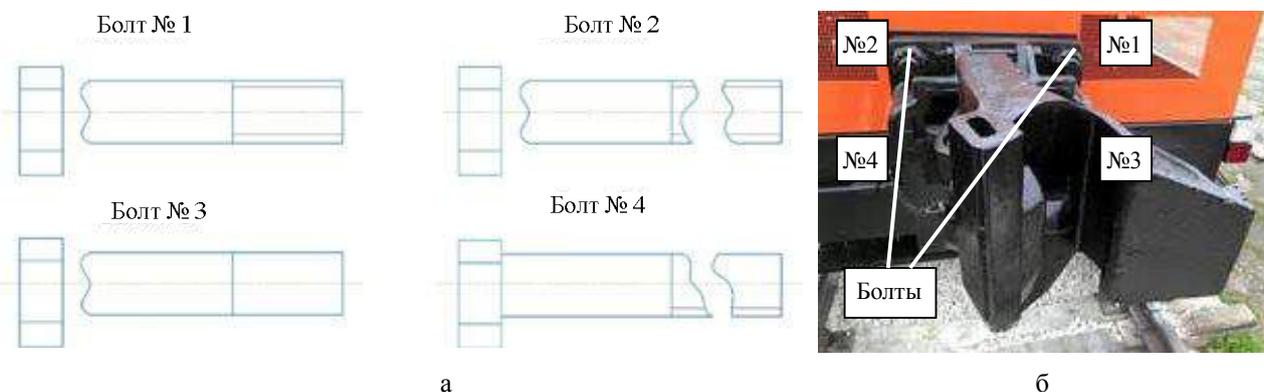


Рисунок 5 – Места расположения изломов исследуемых болтов крепления автосцепного устройства: а – болты с изломами по номерам; б – закрепленная автосцепка на раме крана (болты № 3 и № 4 не видны)

Для достижения поставленной цели экспертизы проводились следующие исследования:

1) спектральный анализ металла болтов для определения химического состава и марки сплава, использованного для их производства;

2) определение твердости материала болтов для оценки механических свойств и их соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 898-1-2011 «Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1: Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы» [8];

3) анализ поверхностей изломов для определения вида и характера изломов, мест зарождения изломов, концентраторов напряжений и направлений разрушения материала.

В результате проведенных исследований были получены следующие выводы:

1) визуальный осмотр всех болтов показал отсутствие галтелей в местах сопряжения головок болтов и цилиндрической рабочей части, что является недопустимым, поскольку приводит к возникновению концентраторов напряжений и, соответственно, к образованию круговых трещин в основании головок болтов, а также противоречит техническим требованиям конструкторского чертежа;

2) спектральный анализ материала показал, что болты № 1, № 3 и № 4 соответствуют по химическому составу конструкционной качественной стали 20 пс и стали обыкновенного качества Ст3пс, которая применяется для изготовления металлоконструкций, работающих при положительных температурах. В свою очередь материал болта № 2 соответствует стали 40, а также идентичен по химическому составу литейным сталям 40Л и 35Л (таблица 7), что является отступлением от требований чертежа. Кроме того, сталь 40, содержащая согласно проведенному спектральному анализу 0,28 % кремния (таблица 8), обладает после нормализации пониженной пластичностью ($\psi = 40 \%$) и ударной вязкостью ($KCU = 44 \text{ Дж/см}^2$) в сравнении со сталью 20 пс, что, соответственно, могло стать причиной разрушения болта № 2 в основании головки и резьбовой части при отсутствии переходных галтелей;

Таблица 7 – Отчет сортировки марок исследуемого материала болта крепления ударной розетки

Элемент	Болт автосцепки укладочного крана (обр. № 2)	40, ГОСТ 1050-2013	40Л, ГОСТ 977-88	35Л, ГОСТ 977-88
<i>C</i>	0,392	0,3700 – 0,4500	0,3700 – 0,4500	0,3200 – 0,4000
<i>Si</i>	0,280	0,1700 – 0,3700	0,2000 – 0,5200	0,2000 – 0,5200
<i>Mn</i>	0,662	0,5000 – 0,8000	0,4500 – 0,9000	0,4500 – 0,9000
<i>S</i>	0,026	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
<i>P</i>	0,019	0,0000 – 0,0350	0,0000 – 0,0400	0,0000 – 0,0400
<i>Cr</i>	0,173	0,0000 – 0,2500	–	–
<i>Ni</i>	0,126	0,0000 – 0,2500	–	–
<i>Cu</i>	0,094	0,0000 – 0,2500	–	–
<i>As</i>	0,001	0,0000 – 0,0800	–	–

Таблица 8 – Результаты анализа химического состава материала болта крепления ударной розетки

Образец	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>As</i>
Болт автосцепки укладочного крана (обр. № 2)	0,392	0,28	0,019	0,026	0,173	0,662	0,126	0,094	0,001

3) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 898-1-2011 твердость стали для изготовления болтов, измеренная по методу Роквелла, должна составлять 67 – 95 *HRB*. Проведенные измерения твердости по методу Роквелла по шкале *HRB* показали, что твердость материала всех болтов находится в пределах нормы, однако при этом твердость стали 40 болта № 2 составляет 83,8 – 89,1 *HRB* и превышает твердость сталей 20пс и Ст3пс остальных болтов в 61,9 –

73,4 HRB в среднем на 15 – 20 %, что свидетельствует о ее пониженной ударной вязкости и пластичности;

4) макроструктурный анализ образцов показал, что по краям изломов болтов № 1, № 2 и № 3 (рисунок 6, а – в) в местах сопряжения головки и тела болта имеются неглубокие следы круговой коррозии длиной 30 – 50 мм и глубиной от 1 до 1,6 мм, свидетельствующие об имевшихся на момент разрушения микротрещинах, которые способствовали ускоренному излому головок болтов [9]. Отсутствие галтелей в местах наличия трещин усугубило процесс разрушения крепежных деталей [10].



Рисунок 6 – Поверхности изломов болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства к концевой балке: а – излом головки болта № 1; б – излом головки болта № 2; в – излом головки болта № 3; г – излом резьбовой части болта № 1; д – излом резьбовой части болта № 2; е – излом резьбовой части болта № 3

5) исследуемые образцы имеют волокнистые (матовые) изломы, свидетельствующие о вязком характере разрушения болтов. Однако на поверхностях волокнистых изломов болтов № 1 и № 3, а также, в большей степени, болта № 2 присутствуют следы камневидного излома с гладкой блестящей поверхностью зерен (рисунок 6, г – е), характерного для перегретых сталей или возникающего в случае распространения трещин по границам зерен, что могло спровоцировать ускоренное разрушение болтов. Данный факт может указывать на превышение температуры нагрева стали 40 при нормализации в процессе изготовления болта № 2, что подтверждается более высокими значениями его твердости. Кроме того, на поверхности излома резьбовой части болта № 2 хорошо заметна обрывистая поверхность долома болта по окончании вязкого разрушения (см. рисунок 6, д).

Таким образом, проведенная экспертиза металла болтов позволила установить следующее.

Предположительно излом болтов крепления ударной розетки начался с левого верхнего болта № 2 (см. рисунок 4, б) в месте соединения головки с телом болта из-за наличия кру-

говой микротрещины (см. рисунок 6, б, д), отсутствия галтели и в резьбовой части, а также пониженной пластичности и ударной вязкости стали 40, использованной при изготовлении данного болта. После излома верхнего левого болта № 2 произошел одномоментный излом болтов № 1 и № 3 в местах наибольшей концентрации напряжений в основании головок болтов, где также имелись микротрещины (см. рисунок 6, а, в, г, е) и отсутствовали галтели, в результате действия на них возросших продольно-динамических усилий в составе поезда. После разрушения трех болтов ударная розетка удерживалась на концевой балке кра- на на одном болте № 4 и, соответственно, создаваемый при этом крутящий момент стремился повернуть ударную розетку относительно оси болта (рисунок 7), нарушив соедине- ние автосцепного устройства с рамой кузова.

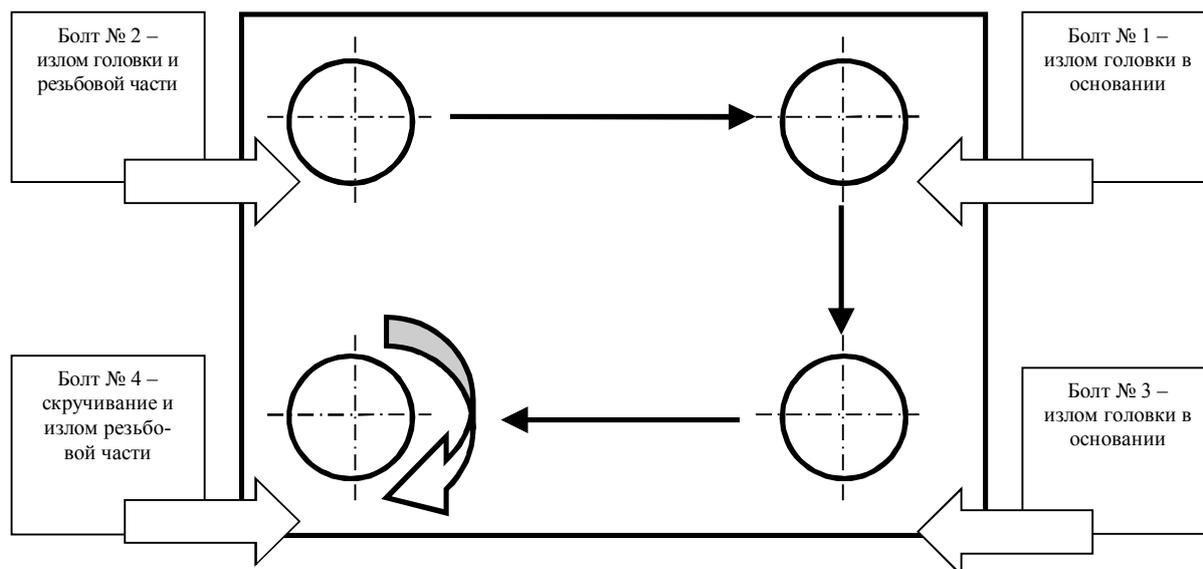


Рисунок 7 – Вероятная схема разрушения болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства к концевой балке

В результате этого возникла существенная скручивающая сила, которая привела к пластической деформации и излому болта № 4 в резьбовой части (рисунок 8).



Рисунок 8 – Излом болта № 4 крепления ударной розетки автосцепного устройства:
а – общий вид излома; б – излом резьбовой части со следами пластической деформации и разрыва витков резьбы

Обосновав и подытожив результаты проведенных исследований, можно сделать выводы:

1. Установлено, что часто для изготовления крепежных деталей подвижного состава применяются конструкционные качественные стали или стали обыкновенного качества, имеющие пониженные механические свойства и не предназначенные для этих целей, что является прямым нарушением требований нормативно-технической документации на крепежные изделия. Это происходит по двум основным причинам: нарушение требований сертификационных документов на крепежные изделия на заводе-изготовителе или производство деталей крепления собственными силами на ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта из некачественных сплавов неизвестных марок.

2. Выявлено нарушение технологии изготовления крепежных деталей и несоблюдение требований конструкторских чертежей при производстве изделий, которое выражается в пренебрежении операциями либо нарушении режимов термической и химико-термической обработки болтов крепления, а также в отсутствии операций протачивания переходных галтелей в основании головок болтов, что приводит к появлению концентраторов напряжений, трещин и снижению общей конструкционной прочности изделия. Именно отсутствие галтелей стало одной из причин разрушения болтов крепления ударной розетки автосцепного устройства укладочного рельсового крана УК-25/9-18.

3. Кроме того, выявлено нарушение периодичности и технологии неразрушающего контроля болтов при проведении технического обслуживания или текущего ремонта подвижного состава. Можно предположить, что проведенное незадолго до разрушения болтов крепления ударной розетки техническое обслуживание либо было выполнено некачественно, либо не проводилось вовсе, поскольку не обнаружило микротрещин в местах соединения тела и головки болтов, что впоследствии привело к их разрушению.

Список литературы

1. Беккер, Ю. Спектроскопия [Текст] / Ю. Беккер. – М.: Техносфера, 2009. – 527 с.
2. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей [Текст] / М. А. Балтер, А. П. Любченко и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
3. Марочник сталей и сплавов [Текст] / А. С. Зубченко, М. М. Колосков и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
4. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Методические указания. РД-50-672-88. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 21 с.
5. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: Учебник [Текст] / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб: Химиздат, 2007. – 784 с.
6. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: Учебное пособие [Текст] / Т. Ю. Степанова / Ивановский гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
7. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
8. ГОСТ Р ИСО 898-1-2011. Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1: Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы. – М.: Стандартинформ, 2013. – 54 с.

9. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учебное пособие [Текст] / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2001. – 61 с.

10. Пачурин, Г. В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов: Учебное пособие [Текст] / Г. В. Пачурин / Нижегородский гос. техн. ун-т. – Нижний Новгород, 2005. – 132 с.

References

1. Bekker Y. U. *Spektroskopiya* (Spectroscopy). Moscow: Tekhnosfera, 2009, 527 p.

2. Balter M. A., Lyubchenko A. P. *Fraktografiya – sredstvo diagnostiki razrushennykh detalej* (Fractography – a tool for diagnosing damaged parts). Moscow: Mashinostroenie, 1987. 60 p.

3. Zubchenko A. S., Koloskov M. M. *Marochnik stalej i splavov* (Marker of steel and alloys). Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p.

4. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Klassifikaciya vidov izlomov metallov. Metodicheskie ukazaniya. RD-50-672-88* (Calculations and strength tests. Classification of types of fractures of metals. GD-50-672-88). Moscow: Standarty, 1981, 21 p.

5. Solncev YU. P. *Materialovedenie: Uchebnik dlya vuzov* (Materials Science). SPb.: HIMIZDAT, 2007, 784 p.

6. Stepanova T. YU. *Tekhnologii poverhnostnogo uprochneniya detalej mashin: uchebnoe posobie* (Surface hardening technology for machine parts). Ivanovo, 2009, 64 p.

7. *Metalloprodukcija iz nelegirovannykh konstrukcionnykh kachestvennykh i special'nykh stalej Obshchie tekhnicheskie usloviya. GOST 1050-2013*. (Metal products from non-alloyed constructional quality and special steels. General technical conditions. State Standart 1050-2013). Moscow, 2014, 32 p.

8. *Mekhanicheskie svojstva krepezhnykh izdelij iz uglerodistykh i legirovannykh stalej. CHast' 1: Bolty, vinty i shpil'ki ustanovlennykh klassov prochnosti s krupnym i melkim shagom rez'by GOST R ISO 898-1-2011*. (Mechanical properties of fasteners made of carbon and alloyed steels. Part 1: Bolts, screws and studs established strength classes with large and fine thread pitch. State Standart ISO 898-1:2009). Moscow: Standartinform, 2013, 54 p.

9. Terent'ev V. F., Oksogoev A. A. *Ciklicheskaya prochnost' metallicheskih materialov: Ucheb. posobie* (Cyclic strength of metallic materials). Novosibirsk, 2001, 61 p.

10. Pachurin G. V. *Povyshenie korrozionnoj dolgovechnosti i ehkspluatacionnoj nadezhnosti izdelij iz deformacionno-uprochnennykh metallicheskih materialov: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* (Improving the corrosion durability and operational reliability of products made of strain-strengthened metallic materials). Novgorod, 2005, 132 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Muraviev Dmitry Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Рауба Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: RaubaAA@omgups.ru

Rauba Aleksandr Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: RaubaAA@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Муравьев, Д. В. Комплексная экспертиза изломов крепежных деталей подвижного состава методами металлографического анализа [Текст] / Д. В. Муравьев, А. А. Рауба // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 10 – 21.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Muraviev D. V., Rauba A. A. Complex examination of breaches of fastening parts of rolling stock by metal-graphic analysis methods. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 10 – 21 (In Russian).

УДК 629.472.3

К. В. Панов

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

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЕПОВСКОГО РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕПЛАНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Аннотация. В данной статье представлено решение задач эффективности функционирования производственных систем локомотиворемонтного предприятия. В частности, объектом исследования являются технологические процессы ремонта и сервисного технического обслуживания электровозов на предприятиях по ремонту тягового подвижного состава. В статье приведено математическое описание производственного процесса подобных предприятий на примере сервисного локомотивного депо Московка. Математическая модель описана на основе теории массового обслуживания (СМО) и цепей Маркова. Приведен граф технологического состояния локомотива во время ремонта в депо, где процесс перехода ремонтируемого подвижного состава из состояния в состояние, т.е. взаимосвязи технологических перемещений электровоза по территории депо, а также время выполнения технологических операций описаны переходной матрицей. Распределение заявок на ремонт описано при помощи закона Пуассона, задержка электровоза на участках депо на плановых видах ремонта – в соответствии с принятой нормой, а на неплановом виде ремонте заявки задерживаются в соответствии с распределением Эрланга.

По результатам математического описания модели производственного процесса ремонтного предприятия создана имитационная модель функционирования депо Московка, реализованная на ЭВМ при помощи профессионального программного обеспечения нового поколения AnyLogic. В работе описаны логическая схема имитационной модели, выбранные методы и библиотеки моделирования. По результатам исследования проведена общая оценка технологических показателей работы локомотиворемонтного предприятия в условиях вероятностных динамических изменений ремонтного задания.

При помощи реализованных предложенных в статье методов исследования технологических процессов депо Московка можно проектировать любые ремонтные предприятия по ремонту подвижного состава железных дорог с целью выявления «узких мест» производственного процесса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, ремонт подвижного состава, депо, теория массового обслуживания, anylogic, граф состояний, матрица переходов, производственный процесс.

Kirill V. Panov

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

DEVELOPMENT OF THE IMITATION MODEL OF DEPOVIAN REPAIR OF LOCOMOTIVES TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILITY OF THE APPEARANCE OF ADDITIONAL TECHNOLOGICAL OPERATIONS

Abstract. *In this article the problems of efficiency of functioning of production systems of the locomotive repair enterprise are solved. In particular, the object of research is the technological processes of repair and maintenance of electric locomotives at the enterprises for repair of traction rolling stock. The article presents a mathematical description of the production process of such enterprises, on the example of the service locomotive depot «Moskovka». The mathematical model is described on the basis of queueing theory (QS) and Markov chains. A graph of the technological state of the locomotive during repair in the depot, where the process of transition of the repaired rolling stock from the state to the state, i.e. the relationship of technological movements of the electric locomotive on the territory of the depot, as well as the time of technological operations described transition matrix. The distribution of repair requests is described by the Poisson law, the delay of the electric locomotive in the depot areas in the planned types of repair in accordance with the accepted norm, and in the unplanned form of repair, the applications are delayed in accordance with the distribution of erlang.*

Based on the results of the mathematical description of the model of the production process of the repair enterprise, a simulation model of the operation of the Moskovka depot was created, implemented on a computer with the help of professional software of a new generation – AnyLogic. The paper describes the logic diagram of the simulation model, selected methods and modeling libraries. According to the results of the study, the overall assessment of technological performance indicators of the locomotive repair enterprise, in the conditions of probabilistic, dynamic changes in the repair task.

By means of the methods of research of technological processes of depot «Moskovka» realized in article, it is possible to design any repair enterprises on repair of a rolling stock of the railroads, for the purpose of identification of «bottlenecks» of production process.

Keywords: *simulation modeling, rolling stock repair, depot, queueing theory, anylogic, state graph, transition matrix, production process.*

Моделирование является одним из способов решения практических задач. Часто решение проблемы нельзя найти путем проведения натуральных экспериментов: строить новые объекты, разрушать или вносить изменения в уже имеющуюся инфраструктуру может быть слишком дорого, опасно или просто невозможно. В таких случаях строят модель реальной системы, т. е. описывают ее на языке моделирования [1, 2].

Ремонтное производство подвижного состава носит стохастический характер, оно практически не может быть точно рассчитано при помощи небольшого количества простых аналитических формул и нуждается в использовании имитационного моделирования производственного процесса на ЭВМ [3]. Для решения подобных задач необходимо максимально использовать современные методы моделирования, которые позволяют в короткие сроки исследовать различные варианты совершенствования работы локомотиворемонтного предприятия.

В качестве примера объекта моделирования выбрано сервисное локомотивное депо Московка, которое является крупнейшим электровозоремонтным предприятием на территории Западно-Сибирской железной дороги ОАО «РЖД». Ключевой задачей ремонтного депо является обеспечение надежной, безотказной работы в эксплуатации электровозов серии 2ЭС6 и ВЛ11 на Омском территориальном отделении ЗСЖД сети ОАО «РЖД» [4, 5]. Технологическое проектирование подобных предприятий по ремонту и техническому обслуживанию тягового подвижного состава является сложной и ответственной задачей [6, 7].

На рисунке 1 представлена сетевая модель (граф) нахождения локомотива на технологических позициях во время ремонта в депо. При этом вершины графа отображают участки ремонта депо, а дуги графа – связи между соответствующими участками.

В процессе ремонта в депо локомотив может находиться на следующих позициях: S_0 – очередь на ремонт (нахождение локомотива на тракционных путях депо); S_1 – участок тех-

нического обслуживания; S2 – участок малого периодического ремонта; S3 – участок большого периодического ремонта; S4 – участок обточки колесной пары; S5 – участок непланового ремонта; S6 – приемка электровоза, процесс ТО-1.

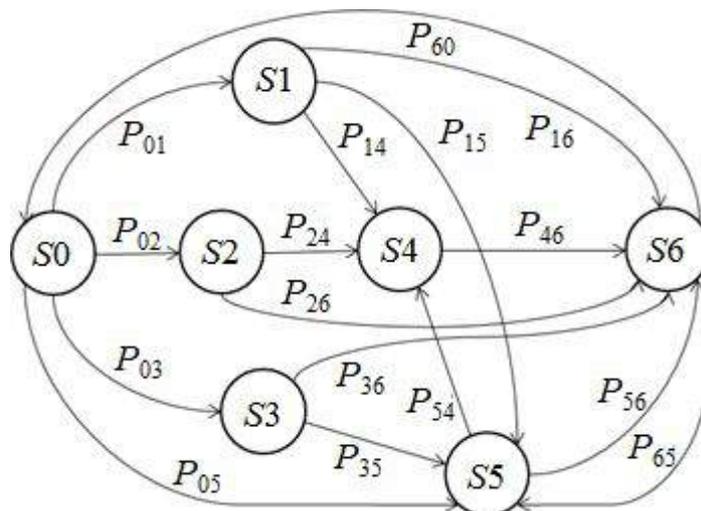


Рисунок 1 – Граф нахождения локомотива на технологических позициях во время ремонта в депо

Процесс перехода ремонтируемого локомотива из текущего состояния S_i в состояние S_j (т. е. перемещение объекта ремонта с одной технологической позиции на другую) определяется вероятностью P_{ij} . Соответственно взаимосвязи технологических перемещений локомотива в депо можно будет представить в виде матрицы.

$$G_k = \begin{pmatrix} - & (P_{12}, t_{12}) & \dots & (P_{1j}, t_{1j}) & \dots & (P_{1n}, t_{1n}) \\ (P_{21}, t_{21}) & - & \dots & (P_{2j}, t_{2j}) & \dots & (P_{2n}, t_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (P_{i1}, t_{i1}) & (P_{i2}, t_{i2}) & \dots & (P_{ij}, t_{ij}) & \dots & (P_{in}, t_{in}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (P_{n1}, t_{n1}) & (P_{n2}, t_{n2}) & \dots & (P_{nj}, t_{nj}) & \dots & - \end{pmatrix}, \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_j} P_{ij} = 1; \\ \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} = 1; \\ k = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (1)$$

где n – количество вершин графа (технологических участков), $n = 7$;

$P_{ij} = [0, 1]$ – технологическая связь между i -й и j -й позициями (вероятность перехода): $P = 1$, если операции выполняются последовательно и безусловно, $P = 0$, если связь отсутствует;

t_{ij} – время перемещения объекта с i -й на j -ю позицию, мин.

При этом время выполнения технологических операций определяется матрицей:

$$OT = \begin{pmatrix} (ot_{11}^{\min}, ot_{11}^{\max}) & (ot_{12}^{\min}, ot_{12}^{\max}) & \dots & (ot_{1m}^{\min}, ot_{1m}^{\max}) \\ (ot_{21}^{\min}, ot_{21}^{\max}) & (ot_{22}^{\min}, ot_{22}^{\max}) & \dots & (ot_{2m}^{\min}, ot_{2m}^{\max}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (ot_{i1}^{\min}, ot_{i1}^{\max}) & (ot_{i2}^{\min}, ot_{i2}^{\max}) & \dots & (ot_{im}^{\min}, ot_{im}^{\max}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (ot_{n1}^{\min}, ot_{n1}^{\max}) & (ot_{n2}^{\min}, ot_{n2}^{\max}) & \dots & (ot_{nm}^{\min}, ot_{nm}^{\max}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $ot_{ij}^{\min}, ot_{ij}^{\max}$ – минимальное и максимальное время выполнения операции на i -й позиции для j -го типа элементарного потока (объекта ремонта), мин.

Время технологической подготовки и переналадки ремонтной позиции при смене объекта ремонта

$$pt_{ij} = (t_{ij}^{(1)}, t_{ij}^{(2)}, \dots, t_{ij}^{(n)}), \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, m, \quad (3)$$

где pt_{ij}^k – среднее время переналадки k -й позиции при смене объекта ремонта с i -го на j -й тип ($t = 0$, если подготовка и переналадка не требуются).

Формирование потока заявок на обслуживание в виде потока заявок на ремонт с интенсивностью поступления в ремонт, 1/день (ч),

$$Pot = (pot_1(t), \dots, pot_m(t)), \quad t = 1, \dots, 24. \quad (4)$$

Среднесуточная программа ремонта

$$\overline{Pot}(t) = (\overline{pot}_1(t), \dots, \overline{pot}_m(t)) = \frac{1}{30}(vol_1, \dots, vol_m), \quad t = 1, \dots, 30. \quad (5)$$

Результаты математического описания модели производственного процесса депо реализованы на ЭВМ. Для разработки модели был выбран программный продукт AnyLogic. В качестве метода имитационного моделирования было выбрано агентное моделирование. Логика функционирования депо проектировалась при помощи встроенных библиотек: Библиотеки моделирования процессов и Железнодорожной библиотеки [8]. В процессе моделирования были учтены различные нештатные ситуации (неплановый ремонт, неплановые перемещения электровоза по тракционным путям депо, объем технологических операций, время восстановления работоспособности объекта ремонта и др.).

Данную модель можно разбить на несколько подсистем: формирование заявки и очередь на ремонт электровоза; формирование заявки маневрового локомотива; процесс соединения маневрового локомотива с электровозом (для установки и покидания заявки на необходимый участок в зависимости от вида ремонта); задержка заявки на участке ремонта (в соответствии с видом ремонта); выход заявки из системы; регистрация параметров производственного процесса.

Вероятность поступления на ремонт N объектов ремонта k -й серии за время Δt распределено по закону Пуассона (рисунок 2) [9, 10]

$$p_N = \frac{(pot_k \cdot \Delta t)^N}{N!} \cdot e^{-pot_k \cdot \Delta t}. \quad (6)$$

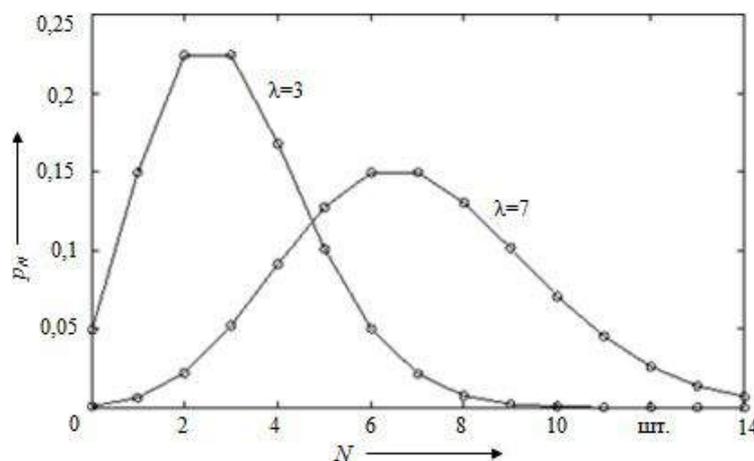


Рисунок 2 – Вероятностная модель потоков заявок на ремонт

Формирование заявки происходит при помощи группы блоков 1 (рисунок 3), для каждого вида ремонта происходит своя заявка на ремонт, заявки TP-1 (TP-30) и TP-2 (TP-300) объединены в дальнейшем в один поток, так как в депо технологические операции данного вида ремонта выполняются в одних и тех же цехах. При выходе заявки из блоков формируется параметр, который задает значение ремонтируемой единицы, сохраняющееся на протяжении всего моделирования. Это необходимо для того, чтобы объект ремонта в будущем понимал, к какому виду ремонта он принадлежит и сколько по времени должно занять его нахождение в цеху. Группа блоков 2 добавляет ремонтируемую единицу на территорию депо, если все стойловые участки заняты в том цеху, куда поступает электровоз в соответствии со своим видом ремонта, и формируется очередь 3. Занятость этих стойловых участков контролируют блоки 4, которым задается значение в соответствии с количеством стойловых участков в цеху на производстве.

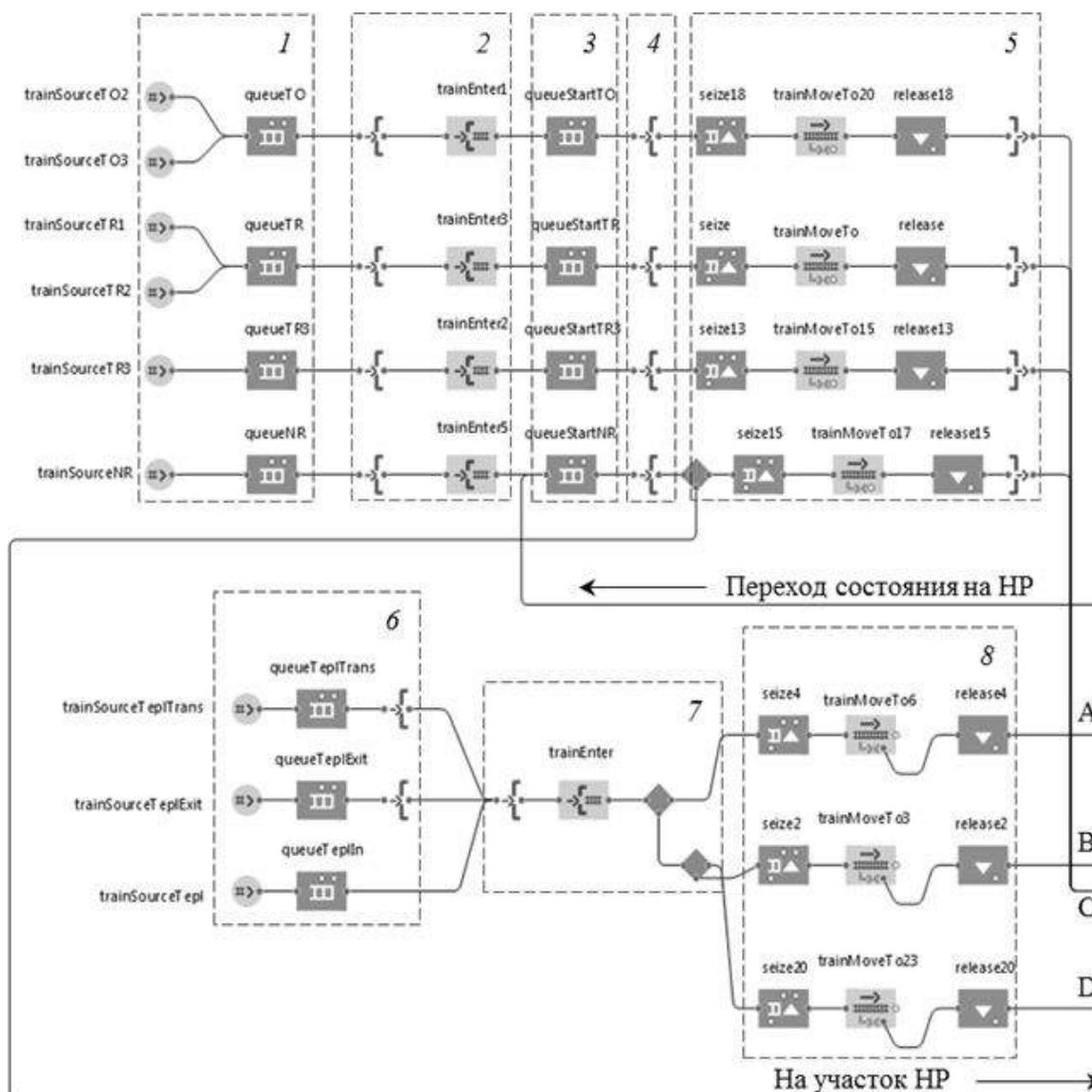


Рисунок 3 – Логическая схема имитационной модели (часть 1)

Блоки группы 5 перемещают ремонтируемый электровоз к необходимому в соответствии с видом ремонта производственному цеху, где объект ремонта создает сигнал и начинает ожидать маневровый локомотив для захода на производственный участок.

Заявку на маневровый локомотив создают блоки 6 и при помощи блоков 7 производят его ввод в систему модели. Путь и перемещение к ожидающему заходу в цех электровозу локомотив находит при помощи блоков 8.

Блоки 9 (рисунок 4) производят сцепку маневрового локомотива и объекта ремонта, перемещение в цех и отцепку. Далее локомотив перемещается в точку своего создания и покидает модель 10.

Ремонтируемый подвижной состав поступает к блокам 11, где формируется задержка в системе. Для каждого вида планового ремонта существует свой временной блок (выполнение технологической операции) в соответствии с Руководством [11].

На неплановом виде ремонта заявки задерживаются в соответствии с особым случаем гамма-распределения – распределением Эрланга (рисунок 5) [12].

$$P_i = \frac{(t - t_{\min})^{m-1}}{\beta^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{t - t_{\min}}{\beta}\right), \quad (7)$$

где m – фактор формы вероятностного распределения, $m = 2$;

β – коэффициент масштаба, $\beta = 1,4$.

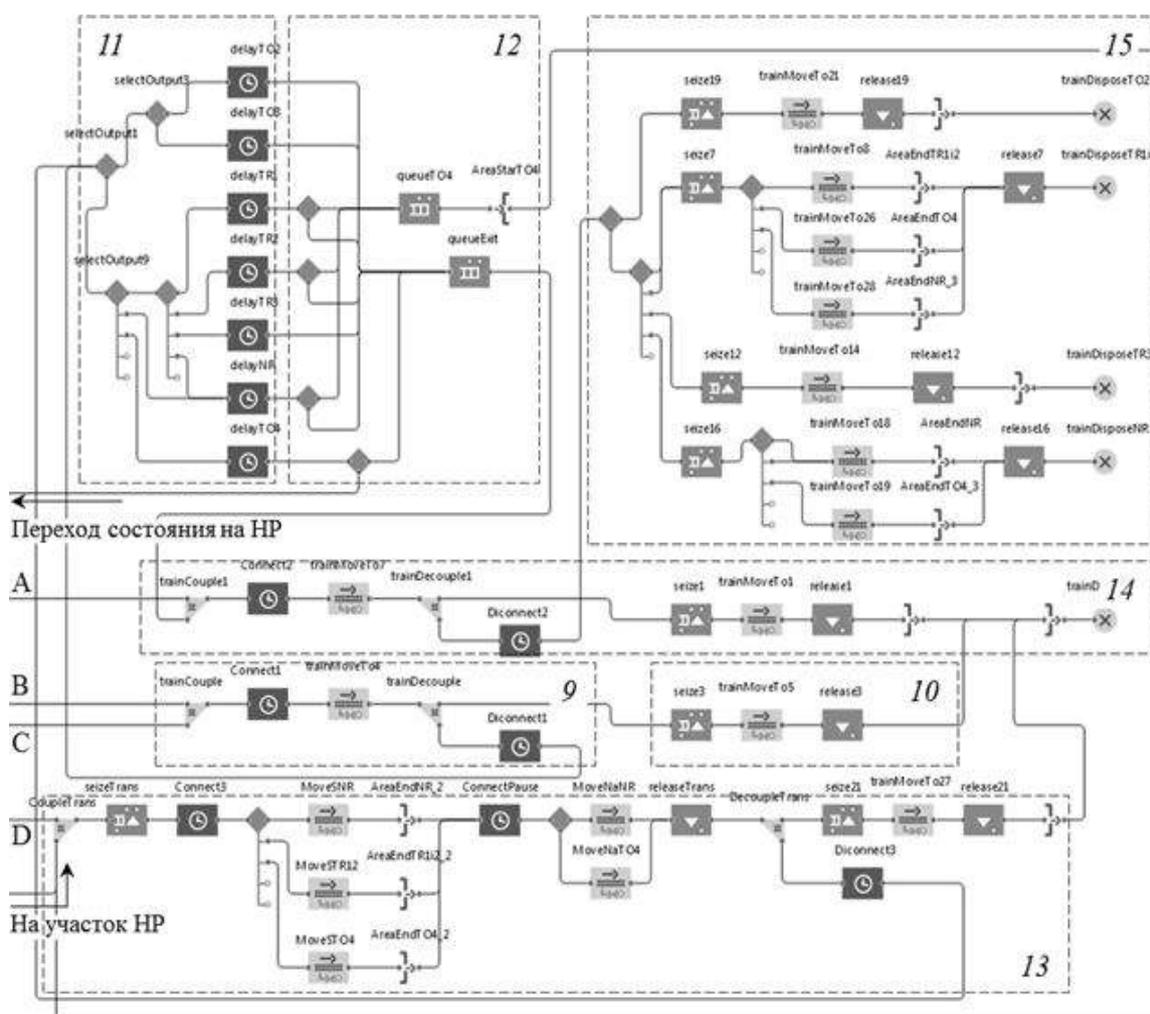


Рисунок 4 – Логическая схема имитационной модели (часть 2)

С определенной вероятностью P_{ij} в соответствии с графом на рисунке 1 электровозу может потребоваться изменить технологическую позицию из-за изменения вида ремонта, ухода на неплановый ремонт, потребности в обточке колесной пары и т. д. Данная вероятность перехода выражена в блоках 12, после чего ремонтируемая единица занимает очередь на следующую позицию и вызывает маневровый локомотив (МЛ) для перемещения. При помощи блоков 13 локомотив после того, как освободился от другой загрузки, перемещает электровоз на необходимый участок ремонта и уходит на место появления в системе, откуда покидает модель и ждет следующего вызова.

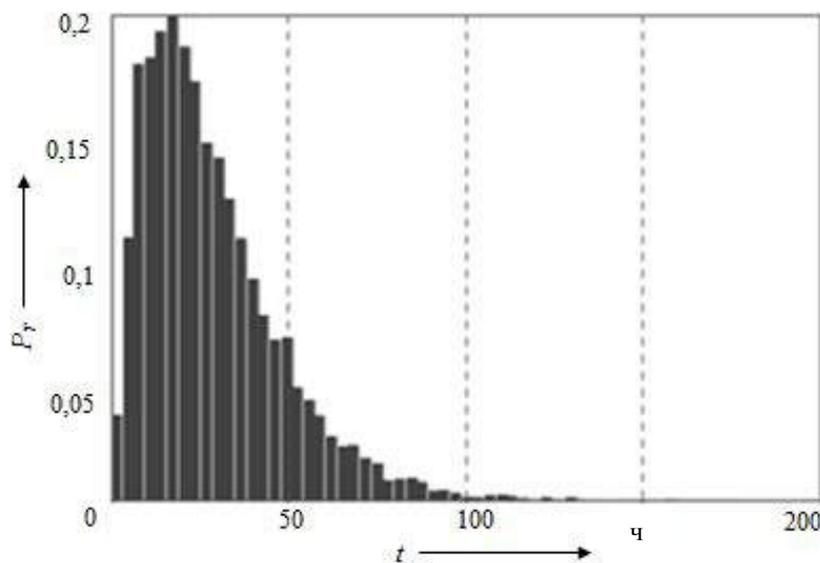


Рисунок 5 – Вероятностное распределение времени выполнения непланового ремонта

Если переход на другую позицию ремонтируемому электровозу не требуется, заявка полностью прошла обслуживание и готова к эксплуатации, а блоки 14 при помощи МЛ перемещают объект ремонта из цеха и тоже удаляются из модели. Сам электровоз проходит ТО-1, проводимое локомотивной бригадой, и после освобождения тракционных путей депо покидает модель при помощи блоков 15.

В качестве примера рассчитаем некоторые параметры технологического процесса локомотиворемонтного предприятия. Степень использования технологических участков предприятия по времени обуславливается коэффициентом загрузки k_3^{ty} . Для данной операции этот коэффициент определяется по формуле

$$k_3^{ty} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{T_0 \cdot n}, \quad (8)$$

где n – количество технологических позиций на участке (количество стойловых участков цеха);

T_i – время нахождения электровоза на технологической позиции;

T_0 – общая длительность исследуемого временного отрезка.

Как изменялось среднее значение коэффициента загрузки технологического k_3^{ty} в течение времени для каждого участка ремонта показано на рисунке 6.

Одним из показателей эффективности СМО с ожиданием (неограниченной очередью) является среднее время пребывания заявки в очереди $T_{оч}$. Возможности моделирования позволяют собрать подобную информацию с помощью специальных объектов сбора данных и отразить собранную статистику распределения времени ожидания в очереди на ремонт с помощью гистограмм. Результат распределения вероятности времени ожидания заявки в очереди представлен на рисунке 7.

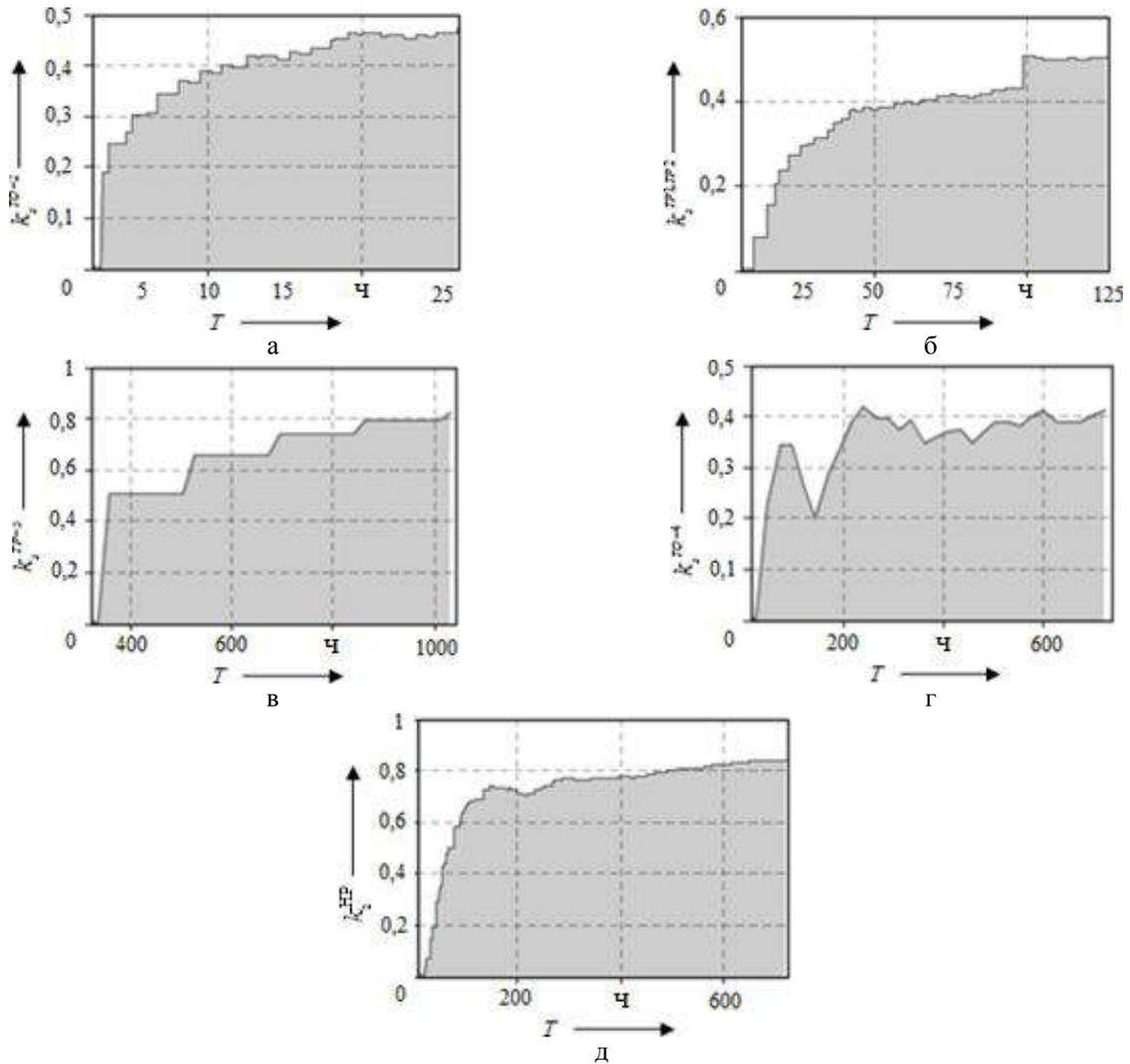


Рисунок 6 – Изменение среднего значения коэффициента загрузки технологического участка k_3^{ty} в течение времени для каждого вида ремонта и обслуживания: а – для участка обслуживания ТО-2; б – для участка ремонта ТР-1 и ТР-2; в – для участка ремонта ТР-3; г – для участка обслуживания ТО-4; д – для участка НР

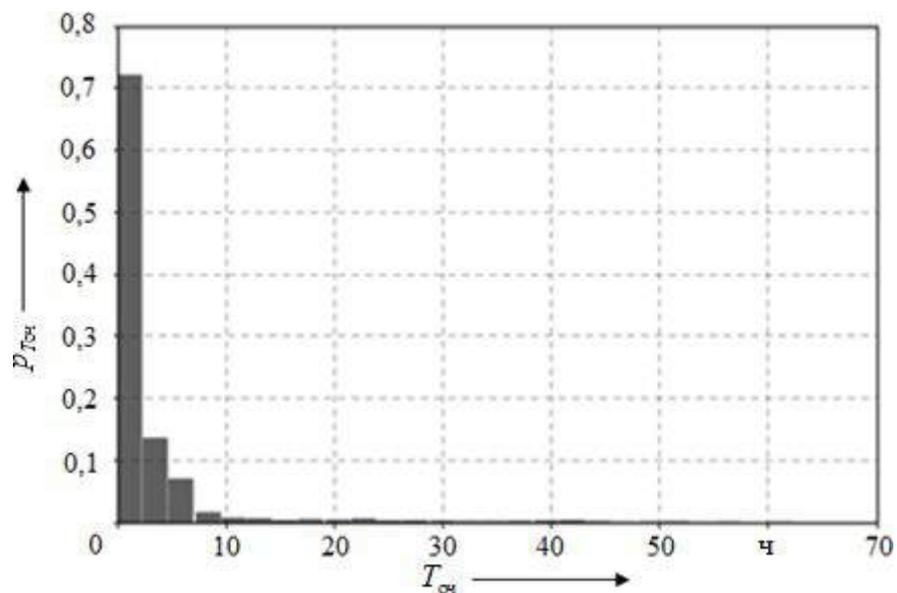


Рисунок 7 – Распределение вероятности времени ожидания заявки в очереди $T_{оч}$ на ТО и ТР

Таким образом, в работе представлена имитационная модель сервисного локомотивного депо Московка, разработанная в компьютерной среде AnyLogic. Произведена общая оценка технологических показателей работы предприятия. В дальнейшем необходимо исследовать поведение технологической структуры депо (изменять технологический процесс ремонта) для определения более эффективных условий функционирования производства.

Список литературы

1. Черняева, С. Н. Имитационное моделирование систем: Учебное пособие [Текст] / С. Н. Черняева, Л. А. Коробова, В. В. Денисенко / Воронежский гос. ун-т информационных технологий. Воронеж, 2016. – 94 с.
2. Мямлин, В. В. Гибкие потоки для ремонта вагонов и особенности имитационного моделирования их работы [Текст] / В. В. Мямлин // Транспорт Российской Федерации / Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., – 2012. – № 3. – С. 57 – 60.
3. Проектирование промышленных предприятий: Принципы. Методы. Практика [Текст]: пер. с нем. / Клаус-Герольд Грундиг. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 340 с.
4. Усманов, Ю. А. Организация, планирование и управление ремонтом подвижного состава: Учебник [Текст] / Ю. А. Усманов / УМЦ ЖДТ. – М., 2017. – 277 с.
5. Доманов, К. И. Проблемы сервисного обслуживания электровозов серии 2ЭС6 и мероприятия направленные на повышение технологии их ремонта [Текст] / К. И. Доманов // Материалы IV всерос. науч.-техн. конф. «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 97 – 103.
6. Моделирование технологических процессов технического обслуживания и ремонта железнодорожного подвижного состава [Текст] / К. А. Сергеев, О. Ю. Кривич и др. // Наука и техника транспорта / Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II. – М., 2018. – № 2. – С. 24 – 28.
7. Собенин, Л. А. Организация, планирование и управление локомотиворемонтным производством: Учебное пособие [Текст] / Л. А. Собенин, А. А. Зайцев, Б. А. Чмыхов / УМЦ ЖДТ. – М., 2006. – 439 с.
8. Боев, В. Д. Концептуальное проектирование систем в Anylogic 7 и GPSS World: Учебное пособие [Текст] / В. Д. Боев. – М., 2016. – 555 с.
9. Есипов, Б. А. Методы исследования операций: Учебное пособие [Текст] / Б. А. Есипов. СПб: Лань, 2013. – 304 с.
10. Лисьев, Г. А. Технологии поддержки принятия решений: Учебное пособие [Текст] / Г. А. Лисьев, И. В. Попова. – М.: Флинта, 2011. – 133 с.
11. О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» [Текст]: Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.01.2005 № 3р / ОАО «РЖД». – М., 2005. – 15 с.
12. Козлов, В. Г. Теория массового обслуживания: Учебное пособие [Текст] / В. Г. Козлов / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. – М., 2012. – 57 с.

References

1. Chernyaeva S. N. *Imitatsionnoe modelirovanie cictem* (Simulated simulation of systems). Voronezh: VSUIT, 2016, 94 p.
2. Myamlin V. V. Flexible yards for the repair of cars and the special equipment of imitation modeling of their work [Gibkie potoki dlya remonta vagonov i ocobennosti imitatsionnogo modelirovaniya ikh raboty]. *Transport Rocciyskoy Federatsii – The journal of Transport of the Russian Federation*, 2007, no. 2(54), pp. 57 – 60.
3. *Klauc-Gerol'd Grundig. Proektirovanie promyshlennykh predpriyatij: Printsipy. Metody. Praktika* (Design of industrial enterprises: Principles. Methods. Practice). Moscow: Alpina Biznec Bucs, 2007. 340 p.

4. Ucmánov YU. A. *Organizatsiya, planirovanie i upravlenie remontom podvizhnogo sootava* (Organizing, planning and managing a repair facility). Moscow: ZhDT Training Center, 2017, 277 p.

5. Domanov K. I. Problems of the service of the electrical system of the 2EC6 series and of the measures aimed at improving the repair of their repair [Problemy cervicnogo obcluzhivaniya elektrovozov serii 2ES6 i meropriyatiya napravlennye na povyshenie tekhnologii ikh remonta]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sootava: materialy IV Vserocciyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Technical support repair and maintenance of the equipment located at the facilities of the second branch of the city of the fourth scientific and technical department of the department of materials the fourth scientific and technical department). Omsk, 2017, pp. 97 – 103.

6. Cergeev K. A. The modernization of technical services of technical services and repair of railroad communications [Modelirovanie tekhnologicheskikh protseccov tekhnicheskogo obcluzhivaniya i remonta zheleznodorozhnogo podvizhnogo sootava]. *Nauka i tekhnika transporta – The journal of science and technology of transport*, 2018. pp. 24 – 28.

7. Cobenin, L. A. *Organizatsiya, planirovanie i upravlenie lokomotivoremontnym proizvodctvom* [Organization, planning and control of the locomotive production]. Moscow: UMT ZDT, 2006, 439 p.

8. Boev V. D. *Kontseptualnoe proektirovanie cictem v Anylogic 7 i GPSS World* (Conceptual design of the systems in Anylogic 7 and GPSS World). Moscow: 2016, 555 p.

9. Ecipov B. A. *Metody icledovaniya operatsiy* (Methods of specification of operations). Saint-Petersburg: Lan, 2013. 304 p.

10. Licev G. A. *Tekhnologii podderzhki prinyatiya resheniy* (Technology Support Decision Making). Moscow: FLINTA, 2011, 133 p.

11. *O cicteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov OAO «RZHD»* (On the system of technical maintenance and repair of locomotives of JSC «Russian Railways»). Moscow, Discharge of Russian Railways, 2005, 15 p.

12. Kozlov V. G. *Teoriya maccovogo obcluzhivaniya* (Theory of Network Maintenance). Moscow: TUSUR, 2012, 57 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Панов Кирилл Вячеславович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (983) 563-45-10.

E-mail: k.v.panov@ya.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Панов, К. В. Разработка имитационной модели деповского ремонта локомотивов, учитывающей вероятность возникновения неплановых технологических операций [Текст] / К. В. Панов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 21 – 30.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Panov Kirill Vyacheslavovich

Omsk State Transport University (OSTU).

Marx Avenue, 35, Omsk, 644046 Russian Federation.

Engineer of the chair «Rolling stock of electric Railways» OSTU.

Phone: +7 (983) 563-45-10.

E-mail: k.v.panov@ya.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Panov K. V., Development of the imitation model of depovian repair of locomotives taking into account the probability of the appearance of additional technological operations. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 21 – 30 (In Russian).

УДК 621.423.1

А. В. Плаксин¹, С. В. Швецов²

¹Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Аннотация. *Эксплуатируемые в настоящее время на сети российских железных дорог пассажирские электровозы при вождении поездов на разных по сложности участках пути неодинаково используют имеющуюся мощность и работают с различными энергетическими показателями.*

Цель работы – рассмотреть энергетическую эффективность пассажирских электровозов при вождении поездов на отдельных участках железных дорог и определить пути повышения их энергетических показателей.

Для достижения указанной цели была проанализирована работа пассажирских локомотивов ЭП1 и ЭП2К на участках среднесибирского хода Западно-Сибирской железной дороги, определены средние массы пассажирских поездов и скорости их движения, рассчитаны значения мощности, реализуемой электровозами в эксплуатации, а также рациональные значения мощности и массы локомотивов, необходимые для вождения пассажирских поездов на рассматриваемых участках пути, и произведена сравнительная оценка возможной эксплуатации электровозов с рациональными значениями мощности и массы с эксплуатируемыми локомотивами ЭП1 и ЭП2К.

На основании проведенного сравнительного анализа сделан вывод об имеющихся резервах повышения энергетических показателей пассажирских электровозов на отдельных участках российских железных дорог, таких как эксплуатация локомотивов с рациональными значениями мощности и массы, необходимых для обеспечения современных пассажирских перевозок, и предложена методика определения энергетической эффективности электровозов, позволяющая без расчета тягово-энергетических характеристик оценить затраты электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова: *расход электроэнергии, масса электровоза, участки пути, энергетическая эффективность, пассажирский электровоз, скорость движения, рациональное значение мощности.*

Alexey V. Plaksin, Semen V. Shvetsov

The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, Russian Federation
Omsk state transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

WAYS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC LOCOMOTIVES OPERATED PASSENGER

Abstract. *Currently operating on the network of Russian Railways passenger electric locomotives, while driving trains on different difficulty stages, not equally utilize the available capacity and work with different energy performance.*

The purpose of the work is to consider the energy efficiency of passenger electric locomotives when driving trains on certain sections of Railways and to determine ways to improve their energy performance.

To achieve this goal, the work of passenger locomotives EP1 and EP2K on the sections of the mid-Siberian railway was analyzed, the average mass of passenger trains and their speed were determined, the values of the power realized by electric locomotives in operation were calculated, as well as the rational values of the power and mass of locomotives needed for driving passenger trains on the considered sections of the track, and a comparative assessment of the possible operation of electric locomotives with rational values of power and mass with the operated locomotives EP1 and EP2K.

On the basis of the comparative analysis, the conclusion is made about the available reserves for increasing the energy indicators of passenger electric locomotives in certain sections of the Russian Railways, such as the operation of locomotives with rational values of power and mass required to provide modern passenger transportation, and the method of determining the energy efficiency of electric locomotives, which allows without calculating the traction and energy characteristics to estimate the cost of electricity for traction of trains.

Keywords: *energy consumption, weight of locomotive, route, energy efficiency, passenger locomotive, the speed, the rational value of the power.*

Одним из основных показателей экономичности работы электрических железных дорог является удельный расход электроэнергии на тягу поездов, который зависит от многих показателей, в том числе и от загруженности локомотива. С целью снижения этого расхода на сети железных дорог в течение многих лет проводят различные мероприятия, одним из которых является увеличение массы состава. И если в грузовом движении удельный расход электроэнергии на тягу можно снижать за счет подбора числа секций электровозов и соответствующей массы состава, то в пассажирском движении такие возможности ограничены имеющимся пассажиропотоком.

Эксплуатируемые в настоящее время на сети российских железных дорог пассажирские электровозы проектировались с запасом мощности с той целью, чтобы водить поезда на различных по профилю пути участках. Учитывая, что отечественные железные дороги характеризуются различными по сложности участками пути, где наряду с горным и холмисто-горным профилем имеются и перегоны большой протяженности с легкими элементами пути, очевидно, что на разных по сложности участках электровозы неодинаково используют имеющуюся мощность и эксплуатируются с различными энергетическими показателями, что подтверждается на примере пассажирских электровозов ЭП20 [1], а также локомотивов ЭП2К, эксплуатируемых на равнинных участках пути большой протяженности [2].

В связи с работой пассажирских электровозов в неоптимальных по энергетическим показателям режимах на равнинных участках железных дорог по причине нерационального использования их мощности [2] представляется целесообразным определить реализуемую мощность и оценить энергетические показатели электровозов при эксплуатации на более сложных, чем равнинные, участках пути. В качестве примера были рассмотрены участки среднесибирского хода Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД), такие как Новосибирск – Белово – Новокузнецк, Карасук – Иртышское – Омск, Новосибирск – Черепаново-Барнаул, Карасук – Барнаул (Черепаново), Барнаул – Артышта и Карасук – Камень-на-Оби, суммарной протяженностью около двух тысяч километров, имеющие различные по сложности пути перевалы, на которых пассажирские поезда водят преимущественно электровозы переменного ЭП1 и постоянного ЭП2К тока. Стоит отметить, что шестиосные локомотивы ЭП1 и ЭП2К в настоящее время являются самыми малыми по мощности (с практически одинаковым значением часовой номинальной мощности, равной 4800 кВт) из эксплуатируемых и выпускаемых отечественной промышленностью магистральных электровозов [2, 3].

В настоящее время максимально разрешенные скорости движения поездов на участках среднесибирского хода ЗСЖД составляют 120 км/ч, а максимальные массы поездов не превышают 1150 т. Анализ профиля пути на перегонах показал, что максимальные подъемы составляют 9 ‰, поэтому профиль пути на рассматриваемых участках можно отнести к III типу по классификациям ВНИИЖТа и МИИТа (среднехолмистый, крутизна расчетного уклона (подъема) $i_p = 9 ‰$) [4].

С целью расчета мощности, которую реализуют электровозы при эксплуатации на рассматриваемых участках, по данным автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машинистов (АС ЦОММ) были определены значения средних скоростей движения и масс пассажирских поездов за 2016 г. Результаты представлены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показал, что средние массы пассажирских поездов и средние технические скорости движения на участках среднесибирского хода ЗСЖД в 2016 г. составляли в пассажирском движении от 115 до 626 т и 53,1 – 76,7 км/ч, а в хозяйственном – от 73 до 526 т и 42,1 – 74,6 км/ч соответственно.

Подвижной состав железных дорог

Таблица 1 – Значения средних скоростей движения и масс пассажирских поездов по видам движения (пассажирское и хозяйственное) на участках Западно-Сибирской железной дороги за 2016 г.

Участок работы	Протяженность участка, км	Вид движения					
		пассажирское			хозяйственное		
		скорость движения, км/ч		масса поезда, т	скорость движения, км/ч		масса поезда, т
		участковая	техническая		участковая	техническая	
Новосибирск – Черепаново	109	49,4	53,1	543	35,4	42,1	230
Черепаново – Новосибирск		52,8	57,8	520	38,5	42,4	221
Барнаул – Черепаново	119	60,6	64,0	482	41,7	47,6	211
Черепаново – Барнаул		60,2	65,3	501	39,7	49,3	214
Новосибирск – Белово	305	59,4	65,5	615	53,6	58,5	344
Белово – Новосибирск		56,9	65,6	619	45,0	54,9	212
Белово – Новокузнецк	141	53,0	58,0	593	41,2	51,6	299
Новокузнецк – Белово		53,3	60,0	582	43,4	51,8	237
Барнаул – Артышта	215	57,7	62,3	413	40,8	49,7	122
Артышта – Барнаул		60,6	63,5	411	35,0	48,4	173
Барнаул – Карасук	445	63,1	69,6	502	47,0	63,3	430
Карасук – Барнаул		63,4	73,1	506	46,2	57,0	277
Карасук – Черепаново	446	59,3	69,1	164	61,4	73,1	526
Черепаново – Карасук		63,8	74,7	167	57,0	70,5	178
Карасук – Камень на Оби	228	54,9	70,1	116	56,2	62,0	107
Камень на Оби – Карасук		53,6	65,8	115	43,8	54,2	73
Иртышское – Карасук	210	68,3	76,7	170	70,5	74,6	114
Карасук – Иртышское		67,6	75,8	168	55,9	64,8	155
Иртышское – Омск	170	73,5	76,7	383	40,2	61,4	185
Омск – Иртышское		72,7	75,6	398	49,0	60,2	122

По полученным значениям скоростей движения и масс поездов были определены средние значения мощности, реализуемой электровозами при эксплуатации на данных участках пути, по формуле [4]

$$P_k = c \cdot V_x \cdot F_x = c \cdot V_x \cdot [m_3 \cdot (w_0' + i_3) + m_b \cdot (w_0'' + w_{\text{пр}} + i_3)], \quad (1)$$

где c – переводной коэффициент, принимаемый равным 2,725;

V_x – ходовая скорость электровоза;

F_x – ходовая сила тяги локомотива;

m_3 и m_b – массы локомотива и вагонов;

$w'_0, w''_0, w_{\text{пр}}$ – основные удельные сопротивления движению электровоза, вагонов и подвагонных генераторов;

i_3 – величина эквивалентного уклона.

Величину эквивалентного уклона можно определить по формуле [5]

$$i_3 = \frac{1}{S} \left[1000(H_k - H_n) + \sum (i_b - w_b) \cdot S_b + \sum w_{кр} \cdot S_{кр} \right], \quad (2)$$

где H_n и H_k – разность отметок начального и конечного пунктов, соответствующих высотам, на которые поднялся и опустился поезд при движении по участку;

S – путь, проходимый поездом по участку;

$S_b, S_{кр}$ – длины вредного уклона (спуска) и кривой участка пути;

i_b – абсолютные значения вредных уклонов (спусков);

$w_b, w_{кр}$ – удельные сопротивления движению на вредном уклоне и от кривой.

Однако расчет по формуле (2) представляет определенные трудности. В некоторых исследованиях [6] величина эквивалентного уклона при расчетах принимается не зависящей от скорости и равной 0,5 – 0,6 ‰. В работе [4] приведены величины эквивалентных уклонов в зависимости от ходовой скорости электровоза и массы поезда на различных по сложности участках пути, где показано, что величины эквивалентных уклонов для участков с III типом профиля пути по классификации МИИТа для электровозов ЧС2 (наиболее близких по мощности к рассматриваемым электровозам) не превышают 1,5 ‰. В связи с этим в данной работе величина эквивалентного уклона для рассматриваемых участков была установлена с запасом и принята равной 2,0 ‰.

В таблице 2 приведены значения мощности, необходимой для преодоления данных участков пути (при профиле пути 2,0 и 9,0 ‰), рассчитанные по формуле (1), и степень ее использования в зависимости от различных скоростей движения (включая максимально разрешенную) и масс поездов. значения степени использования мощности электровозов (K_p) определялись как отношение реализуемой мощности к номинальной [2].

По данным таблицы 2 был сделан вывод, что пассажирские электровозы ЭП1 и ЭП2К при вождении поездов массами 200 – 600 т со скоростями движения от 53 до 77 км/ч на данных участках пути эксплуатируются со средним значением мощности не более 1000 кВт, что соответствует менее 20 % от их номинального значения. Мощность данных локомотивов будет использована полностью только при вождении пассажирских поездов массами 800 т с максимально разрешенными скоростями движения на участках 120 км/ч на расчетных подъемах 9 ‰.

Кроме этого по данным таблицы 2 было определено, что для вождения поездов с максимально разрешенными на участках пути массами и скоростями движения требовались бы электровозы с мощностью 3200 кВт, которая была бы рациональной для осуществления пассажирских перевозок на рассматриваемых участках пути.

Данные значения мощности можно реализовать электровозами в четырехосном исполнении, однако основным критерием при их возможной эксплуатации на рассматриваемых участках пути является ограничение по сцеплению колес с рельсами.

Подвижной состав железных дорог

Таблица 2 – Значения требуемой мощности и степени ее использования пассажирскими электровозами ЭП1 и ЭП2К на рассматриваемых участках пути

Масса поезда, т	Скорость движения, км/ч																							
	50				60				70				80				100				120			
	Профиль пути, $i_p = 2 \text{ ‰}$								Профиль пути, $i_p = 9 \text{ ‰}$ (расчетный подъем)															
$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %	$P_{кв}$, кВт	$K_{р}$, %			
1150	1053	21,9	1261	26,3	1497	31,2	1764	36,7	2405	50,1	3214	66,9	2732	56,9	3725	77,6	4857	101,2	6155	128,2				
1000	928	19,3	1112	23,2	1321	27,5	1557	32,4	2126	44,3	2843	59,2	2411	50,2	3289	68,5	4291	89,4	5441	113,4				
800	760	15,8	913	19,0	1086	22,6	1282	26,7	1754	36,5	2349	48,9	1983	41,3	2709	56,4	3537	73,7	4489	93,5				
700	677	14,1	813	16,9	968	20,2	1144	23,8	1568	32,7	2102	43,8	1769	36,9	2419	50,4	3161	65,8	4014	83,6				
600	593	12,4	714	14,9	851	17,7	1007	21,0	1382	28,8	1855	38,7	1555	32,4	2128	44,3	2784	58,0	3538	73,7				
500	509	10,6	614	12,8	734	15,3	869	18,1	1196	24,9	1608	33,5	1341	27,9	1838	38,3	2407	50,1	3062	63,8				
400	425	8,9	515	10,7	616	12,8	731	15,2	1009	21,0	1361	28,4	1127	23,5	1548	32,2	2030	42,3	2586	53,9				
300	342	7,1	415	8,6	499	10,4	594	12,4	823	17,2	1114	23,2	913	19,0	1257	26,2	1653	34,4	2110	44,0				
200	258	5,4	316	6,6	381	7,9	456	9,5	637	13,3	867	18,1	699	14,6	967	20,2	1276	26,6	1634	34,0				

Ограничение сцепления колес электровоза с рельсами определяется минимальной массой локомотива на расчетном подъеме, которая была рассчитана так [4, 7]:

$$m_{л.сц} = \frac{m_b (w_0'' + w_{пр} + i_p)}{9,81 \cdot \psi \cdot \eta_{сц} - (w_0' + i_p)}, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент сцепления электровоза, определяемый по рекомендациям работы [5];

$\eta_{сц}$ – коэффициент использования сцепной массы электровоза, принимаемый равным 0,86 – 0,94 [4, 5, 8].

Результаты расчетов минимальной сцепной массы пассажирских электровозов (переменного и постоянного тока с коллекторным приводом), вычисленной по формуле (3), приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет минимальной сцепной массы электровоза с коллекторными двигателями

Скорость движения V , км/ч	Масса состава m_c , т	Расчетный подъем i_p , ‰	Коэффициент использования сцепной массы $\eta_{сц}$, %	Электровоз переменного тока		Электровоз постоянного тока	
				коэффициент сцепления ψ	минимальная масса $m_{л.сц}$, т	коэффициент сцепления ψ	минимальная масса $m_{л.сц}$, т
80	1150	9	86	0,240	81	0,226	86

По результатам, представленным в таблице 3, видно, что пассажирские электровозы в четырехосном исполнении (массой 90 – 95 т) на участках с подъемами 9 ‰ способны везти составы с максимально разрешенной массой (1150 т) со скоростью движения 80 км/ч, что превышает среднюю техническую скорость движения на рассматриваемых участках пути.

С целью определения изменения расхода электроэнергии при возможной эксплуатации электровозов с рациональными значениями массы и мощности, необходимыми для эксплуатации на рассматриваемых участках пути, была проведена сравнительная оценка четырехосных электровозов номинальной мощностью 3200 кВт и массой 95 т с локомотивами, осуществляющими пассажирские перевозки на данных участках пути.

Оценка снижения расхода электроэнергии электровозов рассмотрена в работе [9], однако в ней не учтены затраты электроэнергии на собственные нужды локомотивов. Поэтому представляется более объективным оценить энергетическую эффективность электровозов с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды.

Расход электроэнергии при заданном времени движения электровоза по участку с учетом затрат на собственные нужды можно определить по выражению [5, 9]

$$A = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_k(t)}{\eta_T} + P_{сн}(t) \right) dt, \quad (4)$$

где P_k , $P_{сн}$ – значения мощностей, реализуемых на тягу и на собственные нужды локомотива;

η_T – КПД электровоза на тягу;

t_1 , t_2 – время начала и окончания движения локомотива на рассматриваемом участке.

Среднее значение мощности, потребляемой электровозом на собственные нужды, можно найти по формуле [7, 10]

$$P_{сн} = \kappa_{сн} \cdot P_n, \quad (5)$$

где $\kappa_{сн}$ – коэффициент собственных нужд электровоза;

P_n – величина номинальной мощности электровоза.

Уравнение (4) с учетом формулы (5) можно привести к виду [5]:

$$A = \frac{P_k \cdot T}{\eta_T} + P_{сн} \cdot T, \quad (6)$$

а изменение расходов электроэнергии локомотивов можно рассчитать по уравнению

$$\Delta A(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \left(1 - \frac{P_{к2} \cdot T + \kappa_{сн} \cdot P_{н2} \cdot T \cdot \eta_{т2} \cdot \eta_{т1}}{P_{к1} \cdot T + \kappa_{сн} \cdot P_{н1} \cdot T \cdot \eta_{т1}} \right) = \left(1 - \frac{P_{к2} + \kappa_{сн} \cdot P_{н2} \cdot \eta_{т2} \cdot \eta_{т1}}{P_{к1} + \kappa_{сн} \cdot P_{н1} \cdot \eta_{т1}} \right) \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где A_1 , A_2 – расходы электроэнергии сравниваемых электровозов;

$P_{к1}$, $P_{к2}$ – мощности, реализуемые локомотивами;

$\eta_{т1}$, $\eta_{т2}$ – значения КПД электровозов на тягу;

$P_{н1}$, $P_{н2}$ – величины номинальных мощностей локомотивов.

Зависимость реализуемых мощностей электровозов можно определить через разницу их масс ($\Delta m = m_{э1} - m_{э2}$) как $P_{к2} = P_{к1} - \Delta P_k = P_{к1} - (w'_0 + i_s) \cdot \Delta m \cdot V \cdot c$, тогда уравнение (7) можно представить в виде:

$$\Delta A(\%) = \left(1 - \frac{P_{к1} - (w'_0 + i_s) \cdot \Delta m \cdot V \cdot c + \kappa_{сн} \cdot P_{н2} \cdot \eta_{т2} \cdot \eta_{т1}}{P_{к1} + \kappa_{сн} \cdot P_{н1} \cdot \eta_{т1}} \right) \cdot 100 \%. \quad (8)$$

Из анализа выражений (7), (8) можно сделать вывод о том, что разница расхода электроэнергии зависит от следующих величин:

- номинальных мощностей и масс локомотивов;
- значений КПД на тягу электровозов;
- мощностей, реализуемых локомотивами (включая скорость движения).

При определении указанных величин наибольшую сложность представляет вычисление значений КПД на тягу электровозов. Обычно КПД на тягу электровозов определяют по тягово-энергетическим характеристикам (ТЭХ) локомотивов, получение которых является трудоемким процессом и сопряжено с возможными неточностями при их расчете. Кроме этого на электровозах постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями (ТД) можно осуществлять только дискретное регулирование мощности (путем ступенчатого изменения

напряжения на коллекторе и тока возбуждения ТД), поэтому в реальных условиях, используя разные по мощности локомотивы, практически невозможно реализовать идентичные режимы движения поезда и сравнение обычно проводят по близко расположенным к исходной характеристикам, подразумевая, что для поддержания заданной скорости электровоз движется сначала на характеристике с избыточной силой тяги, а затем переходит на характеристику с меньшим (недостаточным) значением силы тяги [2]. В связи с тем, что на реализацию неравномерного режима движения локомотива затрачивается дополнительная энергия, использование такого способа может сказаться на точности проводимого сравнения, а кроме этого усложнит процесс расчета.

Для вычисления КПД электровозов на тягу, на наш взгляд, удобно воспользоваться универсальной процентной характеристикой ТД электровозов, которая позволяет с достаточной для сравнительной оценки точностью определить величину КПД в зависимости от мощности [5] и, не прибегая к трудоемким вычислениям ТЭХ, рассчитать искомую величину как произведение номинального КПД на тягу локомотива (принятого по паспортным данным) на степень его использования, полученную путем аппроксимации табличных значений универсальных процентных характеристик ТД электровоза [2], в связи с чем величину КПД на тягу электровозов можно вычислить так:

$$\eta_{\tau} = \eta_{\tau,н} \cdot C_{\eta} \cdot 100 \% , \quad (9)$$

где $\eta_{\tau,н}$ – номинальное значение КПД электровоза в режиме тяги;

C_{η} – степень использования КПД, которую можно определить по формуле [2]

$$C_{\eta} = -2,9189 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right)^6 + 1,9307 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right)^5 - 5,1905 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right)^4 + 7,2753 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right)^3 - 5,6724 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right)^2 + 2,3434 \cdot \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa н}}\right) + 60,03. \quad (10)$$

С учетом формулы (10) уравнение (8) было приведено к виду:

$$\Delta A(\%) = \left(1 - \frac{(P_{\kappa 1} - (w'_0 + i_s) \cdot \Delta m \cdot V \cdot c) \cdot \eta_{\tau,н 1} \cdot C_{\eta 1} + \kappa_{сн} \cdot P_{н 2}}{P_{\kappa 1} \cdot \eta_{\tau,н 2} \cdot C_{\eta 2} + \kappa_{сн} \cdot P_{н 1}}\right) \cdot 100 \% . \quad (11)$$

Кроме того, с целью оценки долей возможной экономии, полученной за счет изменения величин, влияющих на расход электроэнергии (массы локомотива, КПД на тягу электровоза, номинальной и реализуемой мощностей), была рассчитана разница расхода электроэнергии от изменений:

массы локомотивов –

$$\Delta A_{m_n}(\%) = \left(1 - \frac{P_{\kappa 1} - (w'_0 + i_s) \cdot \Delta m \cdot V \cdot c}{P_{\kappa 1}}\right) \cdot 100 \% = \left(\frac{(w'_0 + i_s) \cdot \Delta m}{(w'_0 + i_s) \cdot m_{н 1} + (w'_0 + w_{пр} + i_s) \cdot m_{в}}\right) \cdot 100 \% ; \quad (12)$$

КПД электровозов на тягу –

$$\Delta A_{\eta_{\tau}}(\%) = \left(1 - \frac{(P_{\kappa 1} - (w'_0 + i_s) \cdot \Delta m \cdot V \cdot c) \cdot \eta_{\tau,н 1} \cdot C_{\eta 1}}{P_{\kappa 1} \cdot \eta_{\tau,н 2} \cdot C_{\eta 2}}\right) \cdot 100 \% - \Delta A_{m_n} \cdot 100 \% ; \quad (13)$$

номинальной мощности, влияющей на затраты электроэнергии на собственные нужды электровозов –

$$\Delta A_{сн}(\%) = (\Delta A - \Delta A_{m_n} - \Delta A_{\eta_{\tau}}) \cdot 100 \% . \quad (14)$$

По формулам (11) – (14) была произведена сравнительная оценка энергетической эффективности электровозов с мощностью 4800 кВт (аналогичных мощности электровозов ЭП1 и ЭП2К) с локомотивами с рациональным значением мощности и массы для эксплуатации на рассматриваемых участках пути (3200 кВт и 95 т соответственно).

При расчетах номинальный КПД электровозов на тягу был принят равным 90,4 % [3], а $\kappa_{сн} = 0,017$ получен из анализа номинальных мощностей и расхода электроэнергии на собственные нужды пассажирских электровозов ЧС2 и ЧС3 [7]. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Анализ сравнения эксплуатации электровозов номинальной мощностью 4800 кВт с электровозами с рациональными значениями мощности (3200 кВт) и массы (95 т)

Скорость движения V , км/ч	Профиль пути i_p / i_r , ‰	Разница расхода электроэнергии ΔA , %				В том числе											
						$\Delta A_{м_л}$, %				$\Delta A_{\eta_т}$, %				$\Delta A_{сн}$, %			
		при массе состава m_c , т															
		1150	620	400	200	1150	620	400	200	1150	620	400	200	1150	620	400	200
120	2	3,3	8,0	12,0	17,8	3,4	5,8	8,1	12,8	-0,8	1,1	2,8	3,8	0,7	1,0	1,1	1,2
100	2	4,3	9,6	13,3	18,2	3,3	5,5	7,8	12,3	0,2	2,8	4,2	4,4	0,9	1,2	1,3	1,5
80	2	5,8	11,2	14,3	18,2	3,0	5,2	7,3	11,7	1,6	4,5	5,3	4,5	1,1	1,5	1,7	2,0
	9	2,1	6,7	10,6	16,7	3,1	5,2	7,4	11,8	-1,6	0,5	2,2	3,7	0,6	0,9	1,1	1,2
60	2	7,9	12,4	14,6	17,9	2,7	4,7	6,7	10,9	3,8	5,8	5,7	4,3	1,4	1,8	2,2	2,7
	9	3,5	8,3	12,3	17,4	2,9	5,0	7,1	11,5	-0,3	2,1	3,8	4,5	0,8	1,1	1,3	1,5
40	2	9,9	12,8	14,4	17,4	2,3	4,0	5,8	9,7	5,8	6,4	5,6	3,7	1,8	2,4	3,0	4,0
	9	5,2	10,6	13,7	17,6	2,7	4,7	6,7	10,9	1,4	4,4	5,3	4,7	1,1	1,4	1,7	2,0

Как видно из данных таблицы 4, при вождении на рассматриваемых участках пути поездов с массами, близкими к средней массе состава, со скоростями движения от 40 до 120 км/ч электровозами с рациональными значениями мощности и массы расход электроэнергии может быть снижен от 6,7 до 18,2 % общего расхода на тягу в зависимости от скорости движения и массы состава. При этом только за счет снижения массы электровоза и затрат электроэнергии на собственные нужды (без учета разницы КПД на тягу) расход электроэнергии может быть уменьшен на 6 – 14 %.

В связи с тем, что участки пути с похожим профилем (III типа) не единичны на сети российских железных дорог, можно сделать вывод о том, что имеются значительные резервы снижения расхода электроэнергии на тягу поездов в пассажирском движении, такие как использование электровозов с рациональными значениями массы и мощности, соответствующими условиям эксплуатации.

На наш взгляд, следует рассмотреть возможность производства пассажирских электровозов в четырехосном исполнении для эксплуатации на отдельных участках железных дорог, что позволило бы существенно снизить расход электроэнергии на тягу. К основным преимуществам четырехосных локомотивов в сравнении с шестиосными помимо снижения расходов на выпуск, эксплуатацию и ремонт стоит отнести возможность осуществления регулирования тяговой мощности путем подбора числа электровозов под поезда соответствующей массы (шестиосные, объединенные по системе многих единиц (СМЕ), на наш взгляд, будут иметь избыточную мощность), в связи с чем они могли бы быть востребованы и на других участках с более сложными условиями эксплуатации. Например, суммарная мощность двух четырехосных электровозов мощностью 3200 кВт, объединенных по СМЕ, составила бы 6400 кВт, что немногим больше мощности восьмиосных пассажирских электровозов ЧС7 (6160 кВт), эксплуатируемых на ряде участков железных дорог, срок службы многих из которых в настоящее время составляет более 30 лет. Возможность осуществления маневра

мощностью электровозов за счет их числа, на наш взгляд, позволила бы значительно снизить расход электроэнергии на тягу, особенно при вождении маловесных и хозяйственных поездов на различных по сложности участках пути.

Следует отметить также, что предложенная методика расчета энергетической эффективности электровозов может быть полезна инженерно-техническим работникам ОАО «РЖД» для оценки изменения расхода электроэнергии, в том числе и для грузовых поездов при формировании электровозов по СМЕ с целью выбора рациональных значений мощностей и масс сцепов локомотивов на различных по профилю пути участках, так как позволяет, не прибегая к трудоемким расчетам ТЭХ электровозов, оценить возможную экономию и затраты электроэнергии на тягу поездов.

Список литературы

1. Андриященко, А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом [Текст] / А. А. Андриященко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Известия Петербургского гос. ун-та путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург. – 2015. – № 4. – С. 5 – 14.
2. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электроэнергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 35 – 47.
3. Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации [Текст] / ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод». – Новочеркасск, 2006. – Т. 1. – 527 с.
4. Кочнев, Ф. П. Вес и скорость пассажирских поездов [Текст] / Ф. П. Кочнев. – М.: Транспорт, 1965. – 276 с.
5. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
6. Черномордик, Г. И. Повышение скоростей движения поездов [Текст] / Г. И. Черномордик. – М.: Транспорт, 1964. – 201 с.
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
8. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов: Учебник [Текст] / Под ред. А. А. Камаева. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
9. Плаксин, А. В. Пути повышения энергетической эффективности при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 43 – 54.
10. Арпуль, С. В. Определение эффективности модульной тяги [Текст] / С. В. Арпуль // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк. – 2014. – № 39. – С. 33 – 37.

References

1. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti passazhirskikh elektrovozov s asinkhronnym tyagovym privodom [Improving the energy efficiency of locomotives with asynchronous traction motor]. *Izvestiya PGUPS – Processing Petersburg Transport University*, 2015, no. 4, pp. 5 – 14.
2. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti snizheniya raskhoda ehlektroehnergii pri ehkspluatacii passazhirskikh ehlektrovov na ravninnyh uchastkah puti [Ways to reduce energy consumption in the

operation of passenger electric locomotives on the flat sections of the road]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 35 – 47.

3. *Elektrovoz EP1: Rukovodstvo po ekspluatacii. t. 1.* (Electric locomotive EP1: manual). Novocherkassk, 2006, Vol. 1, 527 p.

4. Kochnev F. P. *Ves i skorost passazhirskix poezdov.* (Weight and speed of passenger trains). Moscow: Transport, 1965, 276 p.

5. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Transport, 1983, 328 p.

6. Chernomordik, G. I. *Povyshenie skorostej dvizheniya poezdov* (Increase in train speeds). Moscow: Transport, 1964. 201 p.

7. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.

8. Kamaev A. A., Apanovich N. G., Kamaev V. A., Gapeev Y. M., Kononov V. S., Mikhail'chenko, G. S., Nikitin S. V., Simonov V. A., Soroko M. I. *Konstrukciya, raschet i proektirovanie lokomotivov. Uchebnik* (Design, calculation and design of locomotives. Textbook). Moscow: Engineering, 1981, 351 p.

9. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti pri ekspluatacii passazhirskix elektrovozov na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog [Ways to improve energy efficiency in the operation of passenger electric locomotives on flat sections of Railways]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 3 (31), pp. 43 – 54.

10. Arpul, S. V. Opredelenie effektivnosti modulnoj tyagi [Determination of efficiency of modular tags]. *Zbirnik naukovikh Prats. Donst.* 2014, no 39. pp. 33 – 37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал
ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск,
630004, Российская Федерация.

Ведущий инженер дорожного топливно-
энергетического центра.

Тел.: +7 (913) 746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Швецов Семен Васильевич

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: 89040708125@yandex.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Плаксин, А. В. Пути повышения энергетической эффективности эксплуатируемых пассажирских электровазов [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 31 – 40.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the
Russian Federation.

Leading engineer of road fuel and energy centre.

Phone: +7-913-746-38-71.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Shvetsov Semen Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

PhD of technical sciences, Associate Professor of the
department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

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

E-mail: 89040708125@yandex.ru.

Ph. D., associate professor of the department «Rolling
stock of electric railways», OSTU.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Ways to improve the energy efficiency of electric locomotives operated passenger. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 31 – 40 (In Russian).

УДК 629.4.004

А. П. Семенов¹, И. К. Лакин²

¹ ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»), г. Омск, Российская Федерация;

² Инжиниринговый центр «ЛокоТех», г. Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В статье на основании выполненных статистических расчетов по данным об эксплуатации основных серий отечественных локомотивов определены основные направления повышения эффективности эксплуатации локомотивов. Предложен в качестве универсального показателя коэффициент полезной работы. Показано, что наряду с повышением надежности локомотивов большим резервом является повышение эффективности системы управления тягой поездов. Доказано, что число секций локомотивов можно сократить не менее чем на 2000 тыс. секций.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотивы, эффективность эксплуатации, локомотиворемонтный комплекс, надежность, сервисное обслуживание.

Alexandr P. Semenov¹, Igor K. Lakin²

¹ Open Joint-Stock Company «Research Institute of the Railway Transport Control and Diagnostics» (OJSC «RIRTCD»), Omsk, the Russian Federation,

² LocoTech Engineering Center, Moscow, the Russian Federation

LOCOMOTIVE OPERATING EFFICIENCY STUDY

Abstract. Principal directions for increase of locomotive operating efficiency are determined in the article based on statistical estimates as per data on the main domestic locomotive series. Work ratio is suggested as universal indicator. It is demonstrated that in addition to locomotives' reliability enhancement, increase of the trains' haulage management system efficiency is also a large reserve. It is proven that the number of locomotive units can be reduced at least by 2,000 thous. units.

Keywords: rail transport, locomotives, operating efficiency, locomotive repair center, reliability, service maintenance.

В ОАО «РЖД» подготовлена Долгосрочная программа развития компании до 2025 года (ДПР), в которой на основании сравнения эксплуатационных показателей отечественных железных дорог и дорог ведущих железнодорожных держав, а также потребности российской экономики в перевозках предлагаются целевые показатели [1].

По грузовым перевозкам Россия находится на ведущем, сопоставимом с США и Китаем, уровне. По числу грузовых вагонов (1 млн) Россия уступает только США (1,6 млн). При этом грузооборот отечественного железнодорожного транспорта составляет 45 % от общего в России (трубопроводный – 47,8 %, автомобильный – 4,6 %). В общем доходе ОАО «РЖД» (1698 млрд руб.) грузовые перевозки составляют 88 % (1494 млрд руб.), а по дальности перевозок РФ существенно превосходит другие страны (более 1917 км; у США – 1568 км, у Китая – 886 км). При этом участковая скорость – одна из самых высоких в мире – 40,7 км/ч (США – 41,2 км/ч), а стоимость перевозок – одна из самых низких: 1,47 цента США за тоннокилометр (Франция – 5,62, Германия – 4,61, Китай – 2,5, США – 2,46). Рентабельность по ЕВИТДА также на хорошем уровне – 27 % (США – до 42 %, Европа – 18, ЮАР – 42, Индия – 9 %).

Запланировано существенно повысить эффективность функционирования железнодорожного транспорта РФ. Выручка с 2370 млрд руб. в 2018 г. должна вырасти до 3937 млрд руб. в 2025 г. (+66 %). Прибыль – со 157 до 728 млрд руб. (+363 %). Рентабельность по ЕВИТДА – с 18,7 до 29,4 % (+57 %). Рентабельность по чистой прибыли – с 1,5 до 8,8 % (+486 %). Погрузка грузов должна вырасти с 1299 млн т в 2018 г. до 1703,7 млн т в 2025 г.

(+31 %). Грузооборот без учета порожнего пробега должен возрасти с 2595 до 3537 млрд ткм (+36 %).

Очевидно, что опережающий рост экономических показателей по сравнению с техническими можно обеспечить за счет повышения эффективности отрасли. Поставленные задачи невозможно решить без повышения эффективности эксплуатации тягового подвижного состава – локомотивов. Поэтому из инвестиционной программы до 2025 г. в объеме 7553 млрд руб. на подвижной состав запланировано 1213 млрд руб. Проекты тягового подвижного состава относят к проектам с прямым экономическим эффектом.

Особые требования предъявляются к тяговым характеристикам локомотивов: должны возрасти сила тяги, вырасти скорость, уменьшиться динамическое воздействие на путь, повыситься энергоэффективность.

Одновременно должна повыситься надежность локомотивов, снизиться себестоимость жизненного цикла локомотива и сервисного обслуживания. Например, пробег между обслуживаниями на ПТОЛ (ТО-2) должен вырасти до 12 тыс. км. Число отказов на 1 млн км пробега не должно превышать 10. Один из главных показателей надежности локомотива – коэффициент готовности к эксплуатации (КГЭ), который вводится вместо показателя «коэффициент технической готовности» (КТГ). В ОАО «РЖД» поставлена амбициозная задача довести КГЭ до уровня 0,95 (95 %). Для поиска путей повышения эффективности эксплуатации локомотивов выполнен анализ статистической эффективности эксплуатации локомотивов.

Для анализа резервов повышения использования локомотивов выполнен анализ потерь времени при эксплуатации и обслуживании локомотивов по алгоритму, представленному на рисунке 1.

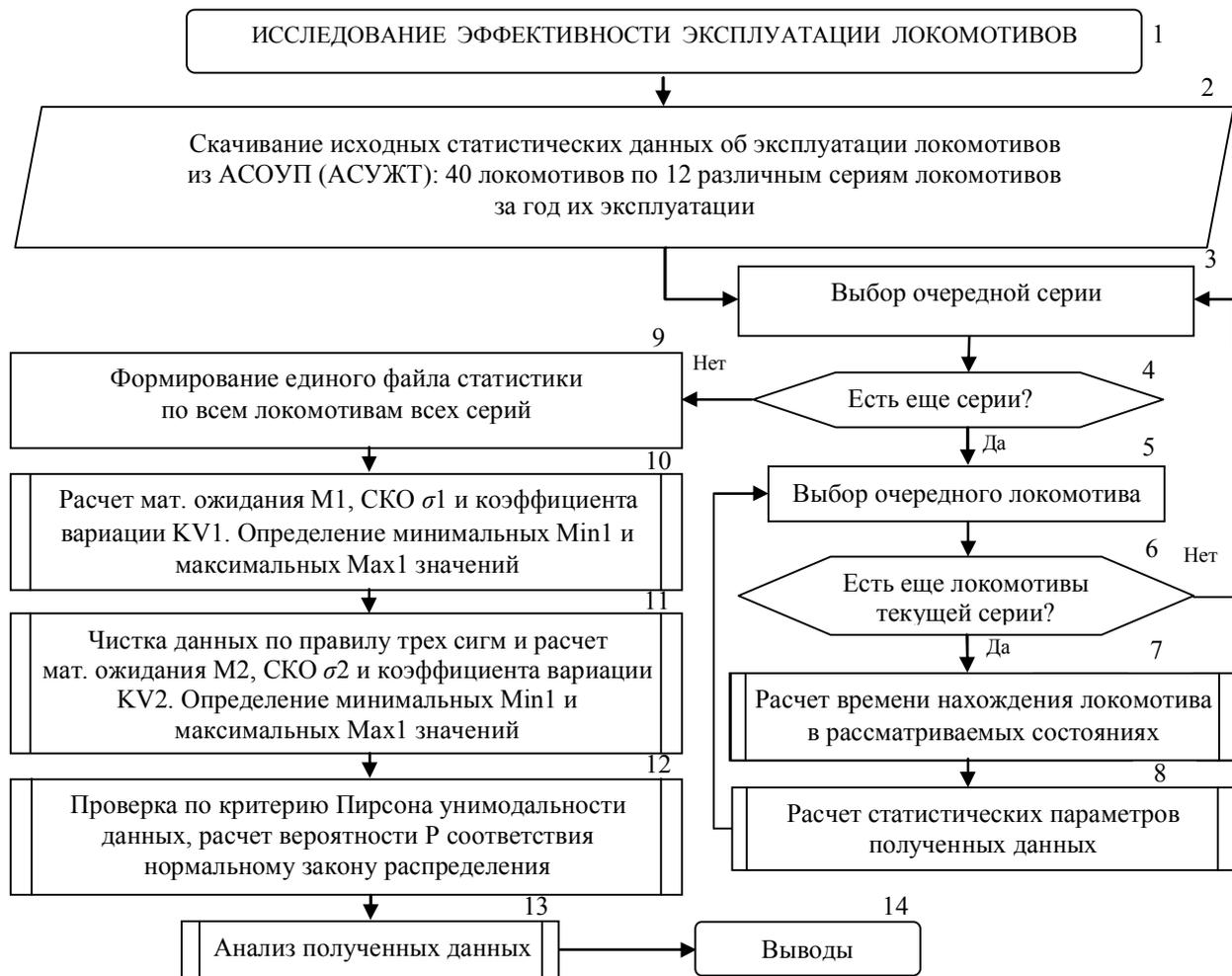


Рисунок 1 – Алгоритм подготовки данных для анализа эффективности эксплуатации локомотивов

Подвижной состав железных дорог

На первом этапе (блок 2) исследования исходные данные об эксплуатации локомотивов были скачаны из информационной системы ОАО «РЖД» под названием АСОУП [2] в Excel-таблицы. Структура скачанных данных приведена в таблице 1. Список рассмотренных серий локомотив приведен в таблице 2: Пять серий электровозов переменного тока, три серии электровозов постоянного тока и четыре серии тепловозов [3]. По каждой серии взято по 40 локомотивов (статистически достоверная (репрезентативная) случайным образом сформированная выборка), по каждому из которых выбраны данные за 400 – 500 дней их эксплуатации: с марта 2017 г. по июль 2018 г. Общее число исходных данных (10 – 14 тыс. событий АСОУП по 40 локомотивам по 12 сериям) превышает 4,8 млн событий.

Таблица 1 – Пример исходных данных АСОУП о работе локомотивов

Тяговый подвижной состав (ТПС)	Серия	Номер	Секция	Дата и время операции	Код состояния	Состояние	Тип состояния	Время в состоянии, мин
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 20:46	102	Прост. приб.	Исправное	74
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 22:00	1	Гол. п.	Исправное	17
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 22:17	1	Гол. п.	Исправное	50
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 23:07	1	Гол. п.	Исправное	123
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:10	1	Гол. п.	Исправное	2
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:12	1	Гол. п.	Исправное	2
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:14	1	Гол. п.	Исправное	1
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:15	102	Прост. приб.	Исправное	34
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:49	113	Сдача брг.	Исправное	14
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 2:03	112	Авт. зах. тч	Исправное	16
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 2:19	105	Ож. работы	Исправное	239
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 6:18	114	Прием брг.	Исправное	107

Таблица 2 – Рассмотренные серии локомотивов

№ п/п	Серия	Тип ТПС	Обоснование выбора
<i>Электровозы переменного тока</i>			
1	ВЛ80С	8 осей, 2 секции	Выпуск: 1961 – 1995. 4921 шт.
2	ВЛ80Р	8 осей, 2 секции	Первый электровоз с ВИП. Выпуск: 1974 – 1986. 373 шт.
3	ВЛ85	12 осей, 2 секции	Первый электровоз с ВИП и АСУ. Выпуск: 1983 – 1994. 373 шт.
4	2ЭС5К	8 осей, 2 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2004. 345 шт.
5	3ЭС5К	12 осей, 3 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2006. 895 шт.
<i>Электровозы постоянного тока</i>			
6	ВЛ10	8 осей, 2 секции	Выпуск: 1961 – 1977. 1902 шт. (модификации – до 1985. 982 шт.).
7	2ЭС4К	8 осей, 2 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2006. 148 шт.
8	3ЭС4К	12 осей, 3 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2014. 55 шт.
<i>Тепловозы</i>			
9	2ТЭ10МК	12 осей, 2 секции	После капитального ремонта оснащен МСУ. Основной локомотив на БАМ. Выпуск ТЭ10: 1958 – 2007. 19 тыс. секций
10	3ТЭ10МК	12 осей, 3 секции	см. 2ТЭ10МК
11	2ТЭ116У	12 осей, 2 секции	Практически современный тепловоз с МСУ. Выпуск: 2007 – 2015. 472 шт.
12	2ТЭ25КМ	12 осей, 2 секции	Современный тепловоз с МСУ. Выпуск: с 2014. 321 шт.

На втором этапе (блоки 3 – 8) последовательно по каждому локомотиву каждой серии выполнена обработка исходных данных с помощью специально написанной программы на встроенном в Excel языке программирования VBA (Visual Basic for Applications) [4]: вычислено общее время нахождения локомотива в различных состояниях, характеризующих эффективность тяги поездов и затраты времени на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) (таблица 3).

Таблица 3 – Рассмотренные коды состояния локомотивов

Название состояния	Расшифровка названия	Тип состояния	Обоснование
Гол. п.	Тяга в голове поезда	Исправное	Основное состояние, в котором локомотив должен находиться как можно дольше при эксплуатации
Ож. работы	Ожидание работы	Исправное	Основной вид потерь при эксплуатации локомотива
ТО-2	Обслуживание на ПТОЛ	ТОиР	Самый массовый вид ТОиР
Ож. ТО2	Ожидание ТО-2	Исправное	Один из основных видов потерь при ТОиР
ТР-1	Обслуживание в объеме ТР-1	ТОиР	Планово-предупредительный ремонт
ТР-2	Обслуживание в объеме ТР-2	ТОиР	Планово-предупредительный ремонт
ТР-3	Обслуживание в объеме ТР-3	ТОиР	Планово-предупредительный ремонт
ТО-4	Обточка колесных пар в депо	ТОиР	Производится по состоянию бандажей
ТР+ТО4	Обточка и ТР	ТОиР	Совмещенные два вида обслуживания
Ож. пер. рем.	Ожидание ремонта	ТОиР	Важно для экономии времени локомотива
Непл. рем.	Неплановый ремонт (НР)	НР	Потери из-за низкой надежности локомотивов
Ож. неп. рем.	Ожидание НР	НР	Вид потерь, которые можно сократить

В результате обработки данных по каждому локомотиву получены следующие данные: общее время в эксплуатации и в ремонте (в минутах и процентах), нахождение в каждом состоянии (в минутах и процентах). Фрагмент таблицы показан в таблице 4.

Таблица 4 – Фрагмент таблицы обработанных данных по серии 3ЭС5К

№ п/п	Локомотив	Время наблюдения, сутки	Средне-суточный пробег, км	Процент времени на обслуживании	Гол. п., %	Ож. работы, %
1	3ЭС5К №1	487	510	20,17	58,55	3,84
2	3ЭС5К №20	487	552	18,00	63,31	3,07
3	3ЭС5К №33	487	415	15,71	8,92	4,71
4	3ЭС5К №55	487	544	18,34	61,88	2,55
5	3ЭС5К №77	494	466	13,57	29,17	5,16
6	3ЭС5К №88	487	529	18,55	61,94	2,57
7	3ЭС5К №100	487	603	10,34	70,32	2,50
8	3ЭС5К №144	487	620	10,10	69,46	2,54
9	3ЭС5К №177	487	590	10,04	69,77	2,89
10	3ЭС5К №200	487	611	7,73	71,92	2,81
11	3ЭС5К №222	488	535	18,80	61,47	2,87
12	3ЭС5К №255	487	498	19,19	52,56	6,08
13	3ЭС5К №277	487	607	10,83	67,87	3,07
14	3ЭС5К №300	487	614	9,93	68,87	3,20
15	3ЭС5К №321	487	546	16,74	64,05	2,71
16	3ЭС5К №333	487	568	16,41	65,32	2,62
17	3ЭС5К №350	487	592	11,26	68,86	2,69
18	3ЭС5К №377	487	575	12,32	66,41	2,89
19	3ЭС5К №400	487	600	10,38	71,11	2,59

Полученные по каждому локомотиву данные (см. таблицу 4) сведены в единую Excel-таблицу (блок 9).

Данные по таблице 5 статистически обработаны также с помощью специально написанной на VBA-программе. По каждому параметру i ($i \in [1, 15]$ – см. таблицу 3) локомотивов каждой серии j ($j \in [1, 12]$ – см. таблицу 2) для выборки $M1_{ijk}$ ($k \in [1, 40]$) рассчитаны математические ожидания $M1_{ij}$, среднеквадратичные отклонения и коэффициент вариации K_{vij} (блок 10), определенные по известным формулам [5]:

$$M1_{ij} = \frac{1}{40} \sum_{k=1}^{40} (M1_{ijk}); \quad (1)$$

$$\sigma_{1ij} = \sqrt{\frac{1}{39} \sum_{k=1}^{40} (M1_{ijk} - M1_{ij})^2}; \quad (2)$$

$$K_{vij} = \sigma_{ij} / M1_{ij}. \quad (3)$$

Отдельные локомотивы за год наблюдения могли длительно простаивать на неплановом ремонте, быть отставленными в запас, по другим причинам полноценно не участвовать в перевозочном процессе. Поэтому после расчета математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (СКО) данные подвергнуты чистке по методу трех сигм: в дальнейшем рассмотрении оставлены только те данные, которые входят в диапазон:

$$M1_{ij} - 3\sigma_{ij} \leq M1_{ijk} \leq M1_{ij} + 3\sigma_{ij}. \quad (4)$$

В результате исходная выборка в $K1 = 40$ данных по ряду параметров уменьшилась до $K2_{ij} \in [38, 40]$ или 0 (например, если локомотивы рассматриваемой серии не заходили на ремонт ТР-2 за рассматриваемый период). Для вновь полученной выборки $K2_{ij}$ произведен расчет математических ожиданий $M2_{ij}$, СКО σ_{2ij} , σ_{2ij} и $K_{v,2ij}$ по формулам (1) – (3) (блок 11). Именно для этих данных выполнен расчет χ^2_{2ij} согласно критерию Пирсона (блок 12). При этом пространство значений параметров $M1_{ijk}$ последовательно было разбито на 6, 7, 8, 9 и 10 диапазонов Δn . Наилучший результат оказался при разбиении на семь диапазонов ($n \in [1, 7]$):

$$\chi^2_{2ij} = \sum_{n=1}^7 \frac{(N_{ijn} - N_{теорijn})^2}{N_{теорijn}}, \quad (5)$$

где N_{ijn} – фактическое число попаданий в диапазон n ;

$N_{теорijn}$ – теоретическое ожидаемое число попаданий в диапазон n :

$$N_{теорijn} = K2 \cdot P_n, \quad (6)$$

где P_n – теоретическая вероятность попадания в диапазон n , которая вычислялась как площадь криволинейной трапеции через сумму площадей $m = 1000$ прямоугольников, на которые разбивался каждый диапазон Δn :

$$P_n = \Delta_n \sum_{n=1}^{1000} \frac{1}{\sigma_{2ij} \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x_n - M2)^2}{2\sigma_{2ij}^2}\right). \quad (7)$$

По полученному значению χ^2 согласно таблице критериев Пирсона определена вероятность P соответствия нормальному закону распределения случайной величины, что позволя-

ет оценить достоверность полученных данных: при вероятности $P > 0,3$ выборку можно считать унимодальной и пригодной для анализа как однородные достоверные данные. В противном случае следует учитывать, что выборка бимодальна и даже мультимодальна.

На основании обработанных данных выполнен последующий анализ (блок 13), основные результаты которого будут приведены далее.

В качестве дополнительного показателя для анализа использован коэффициент корреляции $r_{ij} \in [-1, +1]$ между значениями параметров групп i и j по всем рассмотренным сериям локомотивов:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{12} (M_{ik} - M_i)(M_{jk} - M_j)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{12} (M_{ik} - M_i)^2 \sum_{n=1}^{12} (M_{jk} - M_j)^2}}, \quad (8)$$

где M_i и M_j – математические ожидания параметров i и j ;

M_{ik} и M_{jk} – значения параметров i и j по локомотиву $k \in [1, 12]$.

Коэффициент корреляции позволяет оценить независимость параметров или их взаимное влияние.

Согласно кодировке состояний локомотива АСОУП [2] локомотив может находиться более чем в ста различных состояниях, связанных как с его эксплуатацией (тяга поезда, ожидание работы, перемещение, приемка и др.), так и с его обслуживанием (ожидание ТОиР, ТОиР, перемещение в ТОиР и др.).

Полезную работу локомотив совершает только в состоянии с кодом 1 «Гол. п.» – тяга поезда в голове поезда (работа в режимах «Подталкивание», «Маневровая работа» и другие вспомогательные режимы эксплуатации локомотива не рассматривались, так как выбраны магистральные грузовые локомотивы (см. таблицу 2). Есть состояния, не входящие в понятия «эксплуатация» и «ТОиР», например, постановка в резерв, модернизация и др. Кроме собственно тяги все остальные состояния по сути являются вспомогательными: ожидание работы, приемка локомотива, обслуживание, экипировка – все это плановые или внеплановые потери рабочего времени локомотива.

Таблица 5 – Коэффициент полезной работы локомотивов $K_{АП}$

Серия локомотива	K2	$K_{АП}$, %	σ	K_v	Min ₂ , %	Max ₂ , %	χ^2	P
ВЛ80С	40	53,2	14,2	0,3	18,1	73,2	8,7	0,05
ВЛ80Р	39	64,9	5,4	0,1	53,5	73,1	7,4	0,1
ВЛ85	39	71,4	3,6	0,1	60,7	76,2	19,9	0
2ЭС5К	40	44,3	12,8	0,3	16,3	71,0	3,3	0,5
3ЭС5К	39	66,2	8,1	0,1	29,2	76,2	290,3	0
ВЛ10	40	40,4	13,2	0,3	7,6	52,2	42,5	0
2ЭС4К	40	32,8	11,2	0,3	4,7	50,5	8,1	0,05
3ЭС4К	40	50,6	6,9	0,1	33,7	57,8	23,1	0
2ТЭ10МК	40	34,4	12,3	0,4	14,3	56,8	8,0	0,05
3ТЭ10МК	40	37,4	13,0	0,3	4,8	55,5	13,5	0,001
2ТЭ116У	40	40,5	10,9	0,3	14,8	57,5	11,8	0,01
2ТЭ25КМ	40	40,9	7,0	0,2	24,2	49,5	14,5	0,001
По всем сериям		48,1				76,2		

Таким образом, тяга в голове поезда является единственным «полезным» состоянием локомотива, и время нахождения в этом состоянии должно стремиться к 100 %. В таблице 5 приведены результаты расчета процента нахождения локомотивов рассмотренных серий в

состоянии «Тяга» в голове поезда. При этом вводится понятие «коэффициент (процент) полезной работы» $K_{АП}$:

$$K_{АП} = T_{тяга} / \sum T_i \text{ или } K_{АП} = 100 \% \cdot T_{тяга} / \sum T_i, \quad (9, 10)$$

где $T_{тяга}$ – время нахождения локомотива в состоянии «Тяга в голове поезда»;

$\sum T_i$ – общее время жизненного цикла локомотива за рассматриваемый период.

Из анализа данных таблицы 5 можно сделать следующие выводы.

1. В среднем полезная работа локомотива составляет менее 50 % общего времени его жизненного цикла. Самый низкий процент у тепловозов – в среднем $K_{АП} = 38,3 \%$, по отдельным тепловозам $K_{АП}$ достигал за год 57,5 %. Самый высокий – у электровозов переменного тока: в среднем $K_{АП} = 60 \%$, по отдельным электровозам $K_{АП}$ достигал 76,2 %. Таким образом, согласно практически достигнутым результатам полезную работу локомотивов можно поднять на 20 – 25 % только за счет лучшей организации перевозочного процесса.

2. Полученные данные нельзя считать унимодальными, причиной чему являются различные условия эксплуатации локомотивов в течение года. Относительно унимодальными являются данные по локомотивам серии 2ЭС5К ($P = 0,5$), занятым в местной и вывозной работе.

3. Самой эффективной является эксплуатация локомотивов серии ВЛ85 (71,4 % при максимальном 76,2 %).

4. Сравнение лучших показателей эффективности эксплуатации локомотивов со средними показывает, что резерв повышения эффективности эксплуатации локомотивов составляет в среднем 14,4 %. При повышении эффективности эксплуатации локомотивов даже на 10 % возможно высвобождение не менее 1,5 тыс. локомотивов.

5. С ростом процента полезной работы уменьшается среднеквадратичное отклонение параметра с коэффициентом корреляции $r = -0,42$. Это подтверждает, что упорядочивание перевозочного процесса повышает эффективность тяги, но при этом связь между процентом полезной работы и соответствием нормальному закону отсутствует: $r = -0,07$.

Следовательно, первый существенный резерв повышения эффективности эксплуатации локомотивов заключается в улучшении организации перевозочного процесса и увеличении времени нахождения в состоянии «Тяга поезда» до 70 %.

$$\Delta K_{пр} = 20 \%. \quad (11)$$

Второй показатель, характеризующий эффективность эксплуатации локомотивов, – это среднесуточный пробег, результаты анализа которого приведены в таблице 6.

Данные по пробегам аналогичны данным по проценту тяги в голове поезда. Это подтверждается и коэффициентом корреляции между этими двумя параметрами, который практически равен 100 %: $r = 0,993$. Однако параметр «В голове поезда» является более удобным, так как позволяет сравнивать эффективность тяги по различным сериям локомотивов различных полигонов вне зависимости от установившегося среднесуточного пробега.

Следовательно, важным информативным показателем оценки эффективности эксплуатации локомотивов является процент нахождения локомотива в состоянии «В голове поезда». Показатель «Среднесуточный пробег» не универсален, так как существенно зависит от серии локомотива и полигона его эксплуатации.

В качестве одного из видов эксплуатационных потерь времени в таблице 7 приведены потери в состоянии «Ожидание работы». В этом состоянии локомотив исправен, полностью готов к работе, но не участвует в движении. Из данных таблицы 7 видно, что время ожидания тяги может превышать 10 % и составлять до 40 % от полезной работы.

Таблица 6 – Эффективность тяги поездов КАП по показателю «Среднесуточный пробег»

Серия локомотива	K2	Среднесуточный пробег, км	σ	Kv	Min ₂	Max ₂	χ^2	P
ВЛ80С	40	452	126	0,28	204	735	3,1	0,5
ВЛ80Р	39	569	40	0,07	473	631	4,7	0,3
ВЛ85	40	603	33	0,05	509	643	22,1	0
2ЭС5К	40	379	116	0,31	114	594	19,0	0
3ЭС5К	39	578	44	0,08	466	643	7,2	0,1
ВЛ10	40	306	99	0,32	63	385	45,0	0
2ЭС4К	40	238	81	0,34	40	373	10,8	0,02
3ЭС4К	40	391	96	0,25	190	485	50,4	0
2ТЭ10МК	40	276	105	0,38	124	465	17,6	0,001
3ТЭ10МК	40	293	56	0,19	154	370	6,6	0,1
2ТЭ116У	40	329	93	0,28	116	460	9,6	0,02
2ТЭ25КМ	40	340	63	0,18	191	449	16,8	0,001

Таблица 7 – Процент времени в состоянии «Ожидание работы»

Серия локомотива	Ож. работы, %	σ	Kv	Min, %	Max, %	Тяга, %	Доля ожидания работы от тяги, %
ВЛ80С	4,6	1,46	0,32	1,6	8,9	53,2	8,6
ВЛ80Р	2,7	1,04	0,38	1,3	4,9	64,9	4,2
ВЛ85	1,8	0,45	0,25	1,2	3,2	71,4	2,5
2ЭС5К	6,5	3,20	0,49	1,7	13,9	44,3	14,7
3ЭС5К	2,9	0,69	0,24	1,9	5,2	66,2	4,4
ВЛ10	9,4	3,16	0,34	2,0	16,4	40,4	23,3
2ЭС4К	13,2	6,06	0,46	3,4	26,8	32,8	40,2
3ЭС4К	9,1	2,99	0,33	5,1	15,4	50,6	18,0
2ТЭ10МК	9,7	5,55	0,57	1,5	27,8	34,4	28,2
3ТЭ10МК	6,1	2,39	0,39	3,6	14,2	37,4	16,3
2ТЭ116У	7,2	2,93	0,41	2,9	13,7	40,5	17,8
2ТЭ25КМ	10,9	3,78	0,35	5,4	20,0	40,9	26,7

Следовательно, повысить эффективность эксплуатации локомотивов за счет сокращения простоя в ожидании работы возможно:

- по электровозам переменного тока – на 2 %;
- по электровозам постоянного тока – на 3 %;
- по тепловозам – на 10 %.

При практически возможном сокращении времени ожидания работы в два раза увеличение времени полезной работы

$$\Delta K_{\text{АП Ож. раб}} = 10 \% \cdot 50 \% = 5 \%. \quad (12)$$

Ранее было показано, что эффективность эксплуатации локомотивов $K_{\text{АП}}$ можно поднять на 10 % за счет улучшения организации движения поездов. В настоящем разделе рассмотрен следующий резерв – повышение эффективности технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР). В качестве самого общего показателя взят процент нахождения локомотивов во всех состояниях, связанных с ТОиР (таблица 8).

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Соответствие нормальному закону (униmodalность) достаточно высокое у электровозов переменного тока старых серий: ВЛ80 и ВЛ85. У них также низкий коэффициент вариации. У новых серий 2ЭС5К и 3ЭС5К продолжается отладка технологических процессов ТОиР, из-за чего процесс multimodalен. У тепловозов и электровозов постоянного тока униmodalность практически отсутствует, что связано с наличием неплановых ремонтов и

сверхцикловых работ. Об этом же свидетельствует высокий коэффициент вариации. (Далее по указанной причине вероятность нормальному закону не приводится.)

2. Процент времени на ТОиР существенно превышает ожидаемые в перспективе 5 % [1] и составляет от 11,6 до 37,1 %.

3. Наименьший простой на ТОиР имеют электровозы переменного тока: 10,5 %. Это свидетельствует как о надежности этих локомотивов, так и об отлаженности за последние десятилетия технологии их ТОиР.

4. Имеются претенденты по отдельным локомотивам, когда среднегодовой простой на ТОиР (по данным за 400 дней) был меньше целевых 5 % – это электровозы серий ВЛ80С (4,1 %), ЗЭС5К (4,7 %) и ВЛ10 (2,5 %). Есть примеры, когда простой близок к 5 %: 2ЭС4К (5,1 %), ЗЭС4К (5,8 %), 2ТЭ10МК (5,4 %). Таким образом, сокращение простоя по электровозам переменного тока до 5 % следует считать теоретически достижимым.

5. Простой на ТОиР существенно влияет на среднесуточный пробег локомотивов и процент нахождения в тяге ($r = -0,87$).

6. У тепловозов новых серий простой на ТОиР существенно ниже, чем у тепловозов старых серий: 2ТЭ116У – 18,5 %, 2ТЭ25КМ – 14,9 %. При этом простой остается недопустимо высоким.

Таблица 8 – Процент времени ТОиР в общем бюджете локомотива

Серия локомотива	K2	ТОиР, %	σ	Kv	Min, %	Max, %	χ^2	P
ВЛ80С	38	10,4	3,74	0,36	4,1	20,1	4,7	0,3
ВЛ80Р	39	10,8	2,07	0,19	6,6	14,6	1,7	0,7
ВЛ85	39	10,4	1,94	0,19	6,0	14,4	2,2	0,7
2ЭС5К	39	10,5	4,59	0,44	2,9	20,4	6,7	0,1
ЗЭС5К	40	9,8	3,86	0,39	4,7	18,5	10,8	0,02
ВЛ10	39	12,9	6,63	0,51	2,5	30,8	14,7	0,001
2ЭС4К	40	16,7	6,87	0,41	5,1	37,1	5,4	0,2
ЗЭС4К	39	11,8	5,16	0,44	5,8	26,5	10,8	0,02
2ТЭ10МК	40	20,4	7,29	0,36	5,4	36,8	2,3	0,5
3ТЭ10МК	40	25,3	9,46	0,37	10,2	51,9	6,0	0,1
2ТЭ116У	39	18,5	6,42	0,35	8,2	33,6	2,1	0,7
2ТЭ25КМ	39	14,9	4,22	0,28	6,7	23,9	7,8	0,05

Расчеты показали, что существенную долю в проценте простоя на ТОиР составляет ожидание ТОиР. В таблице 9 приведены процент простоя в ожидании различных видов ремонта и общий процент простоя в состоянии ожидания ремонта (третий столбец справа), он составляет от 5 до 19,6 %. При этом в общем времени, затраченном на ТОиР, ожидание ТОиР составляет в среднем (даже без учета 2ТЭ25КМ) 58 %. Таким образом, непроизводительные потери в области ТОиР только за счет снижения простоя в ожидании обслуживания можно сократить вдвое. Это тем более важно, что в этой области нужны не столько капитальные затраты, сколько наведение логистического порядка. (В АСОУП [2] нет различия ожидания ремонта по их объему, поэтому данные приведены как «Ожидание планового ТОиР».)

Из проведенных расчетов видно, что важным направлением повышения эффективности эксплуатации локомотивов является сокращение времени простоя в ожидании ТОиР. При этом по имеющимся статистическим данным видно, что практически время ожидания можно сократить в два – три раза, сократив общее время ТОиР на 15 – 25 % и повысив тем самым коэффициент полезной работы на $\Delta K_{\text{АП Ож}}$:

$$\Delta K_{\text{АП Ож}} = 10 \% \cdot 20 \% = 2 \%. \quad (13)$$

Таблица 9 – Влияние ожидания ТОиР на эффективность эксплуатации ТПС

Серия локомотива	Доли (%) времени в общем бюджете локомотива					Доля ожидания от ТОиР, %
	ожидание планового ТОиР, %	ожидание ТО-2, %	ожидание НР, %	всего ожидание, %	все виды ТОиР, %	
ВЛ80С	1,5	1,2	1,0	3,7	10,4	36,1
ВЛ80Р	1,5	1,5	1,5	4,4	10,8	40,9
ВЛ85	0,8	1,6	1,1	3,6	10,4	34,4
2ЭС5К	3,3	1,3	0,9	5,5	10,5	52,5
3ЭС5К	2,1	1,2	0,8	4,1	9,8	41,9
ВЛ10	1,2	1,1	0,4	2,7	12,9	20,6
2ЭС4К	3,5	1,9	0,9	6,3	16,7	37,6
3ЭС4К	1,9	0,7	0,8	3,4	11,8	28,6
2ТЭ10МК	2,8	1,4	2,3	6,5	20,4	32,1
3ТЭ10МК	3,5	1,8	3,2	8,4	25,3	33,4
2ТЭ116У	3,3	0,9	2,9	7,1	18,5	38,3
2ТЭ25КМ	4,0	0,9	1,1	6,0	14,9	40,5

В таблицах 10, 11 приведен процент влияния различных видов ТОиР на долю ТОиР в $\Delta K_{АП}$. Из данных таблицы 10 видно, что сам ТОиР составляет примерно 5,2 % потерь $\Delta K_{АП}$, что достаточно не много, но вместе с ожиданием ТОиР потери составляют 14,4 %, что уже существенно. При этом основную долю (85,2 %) в собственно ТОиР составляют обслуживающие в объеме ТО-2 (27,5 %), ТР-1 (35,9 %) и НР (21,8 %). Из статистики работы локомотивов за год видно, что есть локомотивы, у которых эти показатели существенно ниже, поэтому, можно говорить о возможности двойного сокращения времени простоя локомотивов на ТОиР $\Delta K_{АПТОиР}$:

$$\Delta K_{АПТОиР} = 5,2 \% \cdot 50 \% = 2,6 \% \quad (14)$$

Таблица 10 – Доля видов ТОиР в общем бюджете обслуживания без учета времени ожидания и прочих простоев

Серия локомотива	Доля ТОиР в бюджете времени, %	Доля различных видов ТОиР в общем бюджете ТОиР без учета ожидания				
		ТО-2, %	ТР-1, %	ТР-2, %	ТР-3, %	НР, %
ВЛ80С	4,1	29,4	45,8	3,9	5,2	15,7
ВЛ80Р	4,8	30,6	35,2	5,3	4,6	24,2
ВЛ85	6,1	26,5	37,4	7,1	10,3	18,7
2ЭС5К	2,9	45,3	28,3	3,4	7,9	15,1
3ЭС5К	3,3	35,9	34,6	5,9	11,6	12,1
ВЛ10	7,6	13,8	74,0	3,0	2,9	6,3
2ЭС4К	5,2	37,0	37,0	1,3	9,0	15,5
3ЭС4К	4,5	14,5	44,8	8,1	15,3	17,3
2ТЭ10МК	7,3	19,4	31,6	6,7	6,2	36,2
3ТЭ10МК	10,3	17,4	22,3	9,9	1,4	49,0
2ТЭ116У	4,4	21,1	15,7	14,1	13,1	36,1
2ТЭ25КМ	2,4	39,1	24,5	21,5	0,0	14,9
Среднее	5,2	27,5	35,9	7,5	7,3	21,8

Таблица 11 – Доля видов ТОиР в общем бюджете обслуживания с учетом времени ожидания и прочих простоев

Серия локомотива	Доля ТОиР в общем бюджете локомотива, %	Доля видов ремонтов в доле ТОиР от общего бюджета времени			
		ТО-2, %	ТР, %	НР, %	Прочее, %
ВЛ80С	10,4	24,2	36,2	16,1	23,5
ВЛ80Р	10,8	28,4	33,7	24,5	13,4
ВЛ85	10,4	29,3	40,2	22,0	8,6
2ЭС5К	10,5	24,8	42,1	13,0	20,0
3ЭС5К	9,8	24,4	38,8	12,8	24,1
ВЛ10	12,9	24,6	56,7	6,9	11,9
2ЭС4К	16,7	27,8	35,7	10,1	26,4
3ЭС4К	11,8	15,4	42,5	13,2	28,9
2ТЭ10МК	20,4	14,6	29,9	24,2	31,4
3ТЭ10МК	25,3	13,0	30,2	35,7	21,2
2ТЭ116У	18,5	11,1	30,0	25,8	33,1
2ТЭ25КМ	14,9	14,7	35,1	9,9	40,3
Среднее	14,4	20,8	37,1	17,4	24,7

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Общую эффективность эксплуатации локомотивов можно оценить через коэффициент (процент) полезной работы, определяемый как отношение времени нахождения локомотива в состоянии «В голове поезда» к общему времени эксплуатации: $K_{АП} = T_{тяга} / \sum T_i$ или $K_{АП} = 100 \cdot T_{тяга} / \sum T_i$. Нахождение во всех остальных состояниях согласно теории Lean Production следует считать потерями первого (можно устранить) и второго (устранить сложно) рода.

2. Полезная работа локомотивов $K_{АП}$ в среднем составляет 48 % (рисунок 2). При этом есть прецеденты (Best Practice), когда все локомотивы серии имеют $K_{АП} > 70\%$ (ВЛ85). Отдельные локомотивы достигали в среднем за год $K_{АП} > 75\%$ (ВЛ85-233: 76,2 %, ВЛ85-268: 75,7 %, ВЛ85-140: 75,3 %, 3ЭС5К-777: 76,2 % и др.). Таким образом, за счет совершенствования технологии перевозочного процесса и сокращения потерь времени в эксплуатации полезную работу локомотивов можно поднять на $K_{АПЭ} = 10\%$, что приведет к сокращению потребного парка на 2 тыс. секций.

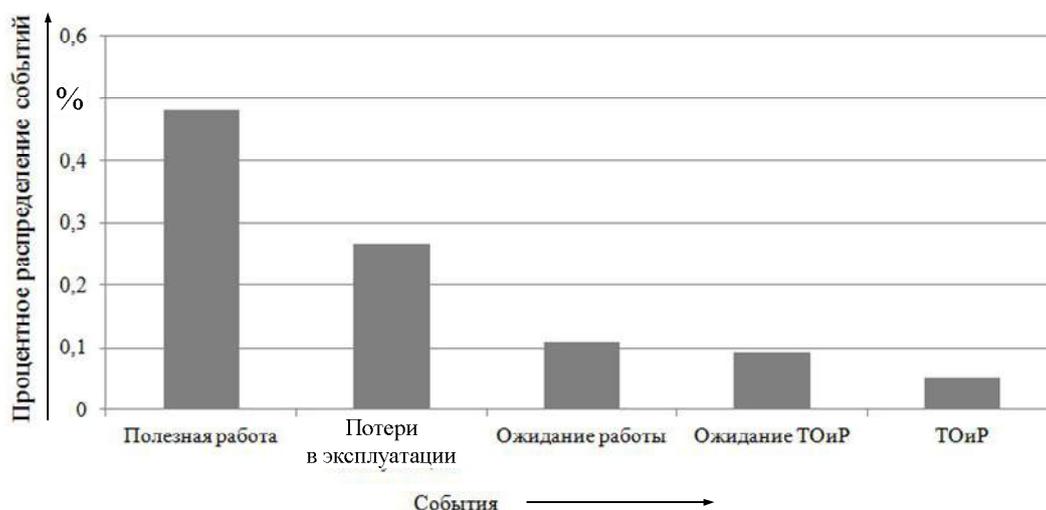


Рисунок 2 – Среднее распределение бюджета времени локомотивов

3. Потери на ТОиР в сумме составляют 14,4 %, из них ожидание ТОиР – 9,2 %, в ожидании работы – 10,9 %. Сокращение времени простоя в ожидании в два раза позволит повысить коэффициент полезной работы $\Delta K_{АПОж}$ на 5 %.

4. Сам простой локомотивов на ТОиР составляет 5,2 % и не является решающим резервом повышения коэффициента полезной работы, поэтому решающим для перевозочного процесса является стоимость жизненного цикла локомотива.

5. Для сокращения времени простоя локомотива на ТОиР необходимо проведение следующих мероприятий:

– увеличение межремонтных пробегов за счет совершенствования конструкции локомотивов;

– внедрение крупноагрегатных методов ремонта;

– внедрение бортовых систем технического диагностирования на базе микропроцессорных систем управления и соответствующих датчиков для частичного перехода на ремонт по техническому состоянию [7];

– внедрение деповских переносных и стационарных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) для дальнейшего внедрения системы ремонта по фактическому техническому состоянию [8];

– цифровизация процессов управления сервисным локомотивным депо и жизненным циклом локомотива с целью создания прозрачной технологии ТОиР [9].

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2018. – 93 с.

2. Автоматизированная система оперативного управления перевозками. Дорожный уровень. База данных АСОУП-2 [Текст] / АО «НИИАС». – М., 2005. – 24 с.

3. Раков, В. А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956 – 1975 гг.) [Текст] / В. А. Раков. – М.: Транспорт, 1999. – 443 с.

4. Уокенбах, Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA [Текст]: Пер. с англ. / Дж. Уокенбах. – М.: Вильямс, 2014. – 944 с.

5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Академия, 2003. – 464 с.

6. Womak J. P. The machine that changed the world. The story of lean production. 1991. 323 p.

7. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К. В. Липа, А. А. Белинский и др. / ООО «Локомотивные Технологии». – М., 2015. – 212 с.

8. На основе средств технического диагностирования и информационных технологий [Текст] / А. П. Семенов, А. С. Вайсбурд и др. // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 7. – С. 181 – 185.

9. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ [Текст] / Под ред. И. К. Лакина / ЗАО «ОЦВ». – М., 2002. – 516 с.

10. Семенов, А. П. Комплексные решения автоматизации технологических процессов диагностирования и ремонта подвижного состава [Текст] / А. П. Семенов, С. В. Елисеев // Материалы X междунар. науч.-практ. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2015. – С. 65 – 68.

References

1. *Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZD» do 2025 goda* (Long-term development program of Russian Railways until 2025), Moscow, Russian Railways OJSC, 2018, 93 p.

2. *Avtomatizirovannaya sistema operativnogo upravleniya perevozkami. Dorozhnyj uroven'. Baza dannyh ASOUP-2* (Automated system of operational traffic management. Road level. Database ASOUP-2), Moscow, JSC NIIAS, 2005, 24 p.

3. *Rakov V. A. Lokomotivy otechestvennykh zheleznykh dorog (1956 – 1975 gg.)* (Locomotives of domestic railways (1956 – 1975)). Moscow: Transport, 1999, 443 p.

4. *Wakenbach, J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA* (Excel 2010: Professional VBA Programming). Moscow: LLC «I. D. Williams», 2014, 944 p.

5. *Ventcel' E.S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya* (Probability theory and its engineering applications). Moscow: Academy, 2003, 464 p.

6. Womak J. P. The machine that changed the world. The story of lean production. 1991. 323 p.
7. Lipa K. V., Belinskiy A. A., Pustovoy V. N., Lakin I. K. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ehkspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika* (Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice). Moscow: LocoTech LLC, 2015, 212 p.
8. Semenov A. P., Vaysburd A. S., Golovash A. N. Based on technical diagnostics and information technology tools [Na osnove sredstv tekhnicheskogo diagnostirovaniya i informatsionnykh tekhnologiy]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2012, no 7, pp. 181 – 185.
- 9 Lakin I. K. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya lokomotivnym khozyaystvom. ASUT* (Automated locomotive management system. ASUT). Moscow: CJSC OCV, 2002, 516 p.
10. Semenov A. P., Eliseev S. V. Complex solutions for automating technological processes for diagnosing and repairing rolling stock [Kompleksnye resheniya avtomatizatsii tekhnologicheskikh processov diagnostirovaniya i remonta podvizhnogo sostava] *Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty»* (Materials X Int. scientific-practical conf. «The rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects»). Sankt-Peterburg, 2015, pp. 65 – 68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенов Александр Павлович

ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»).

Избышева ул., д. 3, корпус 2, г. Омск, 644005, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, генеральный директор.

Тел.: +7 (3812) 44-39-15.

E-mail: corp@niitkd.ru

Лакин Игорь Капитонович

Инжиниринговый центр «ЛокоТех».

Исполнительный директор, доктор технических наук, профессор МИИТа.

Славянская площадь, 2/5/4, стр. 3, Москва, 109074, Российская Федерация.

Тел.: +7-499-638-2298 (доб.77-189).

E-mail: Lakini@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Семенов, А. П. Исследование эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А. П. Семенов, И. К. Лакин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 4(36). – С. 41 – 53.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semenov Aleksandr Pavlovich

Open Joint-Stock Company «Research Institute of the Railway Transport Control and Diagnostics» (OJSC «RIRTCD»)

Izbyшева sr. 3, build. 2, Omsk, 644005, The Russian Federation.

Ph. D, Director General.

Phone: +7 (3812) 44-39-15.

E-mail: corp@niitkd.ru

Lakin Igor Kapitonovich

LocoTech Engineering Center.

Executive Director, Doctor of Engineering, Professor of Moscow State University of Railway Engineering. Slavyanskaya Square, 2/5/4, st. 3, Moscow, 109074, The Russian Federation.

Phone: +7-499-638-2298 (77-189).

E-mail: Lakini@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Semenov A. P., Lakin I. K. Locomotive Operating Efficiency Study. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 4, no 36, pp. 41 – 53(In Russian).

УДК 629.4.02

С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, В. А. Тараненко

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ 2ЭС10

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования силовых полей в элементах колесно-моторного блока электровоза 2ЭС10. Математическая модель получена на основе уравнений Лагранжа II рода. Представлена расчетная схема для исследования динамического поведения колесно-моторного блока. Приведены выражения прогибов упругих элементов подвески тягового двигателя, упругих и диссипативных сил. Предложен способ определения векторного силового поля на площадке сочленения кронштейна и тяги подвески ТЭД.

Ключевые слова: колесно-моторный блок, тяговый электродвигатель, математическое моделирование, уравнения Лагранжа, прогибы и упругие силы, векторное силовое поле.

Sergei G. Shantarenko, Victor F. Kuznetsov, Victor A. Taranenko
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF FORCE FIELDS IN THE ELEMENTS OF A WHEEL-MOTOR BLOCK ELECTRIC SERIES 2ES10

Abstract. The article presents the results of modeling the force fields in the elements of the wheel-motor unit of the electric locomotive 2ES10. The mathematical model is obtained on the basis of the Lagrange equations of the II kind. A design scheme for the study of the dynamic behavior of the wheel-motor unit is presented. Expressions for the deflection of the elastic elements of the traction motor suspension, elastic and dissipative forces are given. A method for determining the vector force field at the articulation site of the bracket and thrust suspension TEM is proposed.

Keywords: wheel-motor unit, traction electric motor, mathematical modeling, Lagrange's equations, deflections and elastic forces, vector force field.

Подвеска тягового электродвигателя (ТЭД) предназначена для смягчения ударов, происходящих на ТЭД при прохождении колесной парой неровностей пути и при трогании с места, а также для компенсации изменения взаимного положения тягового электродвигателя и рамы тележки при движении электровоза [1].

На электровозе серии 2ЭС10 применен тяговый привод первого класса с опорно-осевым подвешиванием тягового электродвигателя и редуктора с односторонней косозубой передачей и моторно-осевыми подшипниками качения. Колесно-моторный блок (далее – КМБ) включает в себя колесную пару, тяговый редуктор и тяговый асинхронный двигатель [2].

Сборка КМБ производится по технологии Siemens AG на заводе-изготовителе локомотива.

Тяговый электродвигатель опирается одним концом на ось колесной пары, а вторым – на раму тележки через маятниковую подвеску (рисунок 1).

Подвешивание тягового электродвигателя к раме тележки осуществлено через поводок 1. На концах поводка установлены два шарнирных блока 3 с амортизаторами, изготовленными из полиуретана на основе МДИ марки Vibrathone 8000. Оси шарнирных блоков крепятся болтами к кронштейнам рамы тележки 5 и тягового двигателя 2.

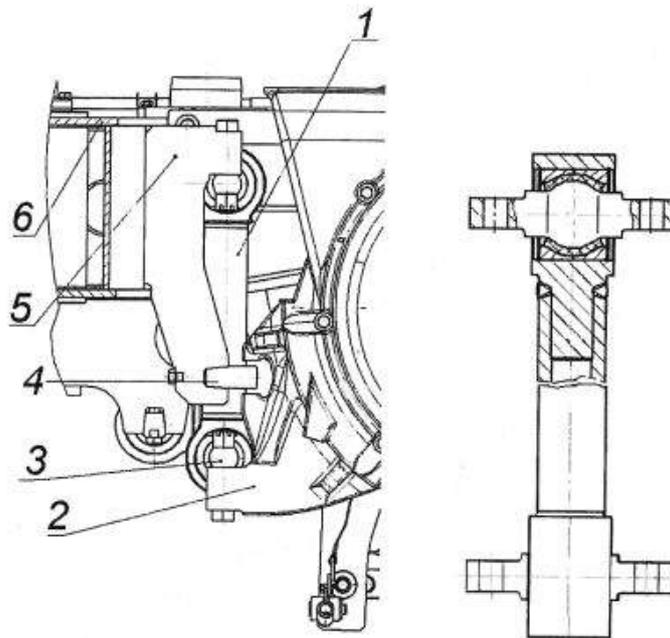


Рисунок 1 – Маятниковая подвеска тягового двигателя: 1 – поводок; 2 – кронштейн двигателя; 3 – блок шарнирный; 4 – страховочный палец; 5 – кронштейн рамы тележки; 6 – рама тележки

В качестве дополнительной страховки при обрыве поводков и исключения падения двигателя на путь служит страховочный палец 4, который вворачивается в кронштейн рамы тележки 5.

С целью анализа надежности элементов подвешивания тягового двигателя проведем моделирование силовых полей в элементах колесно-моторного блока электровоза [3].

Исследуем динамику элементов КМБ по расчетной схеме, приведенной на рисунке 2 [4, 5].

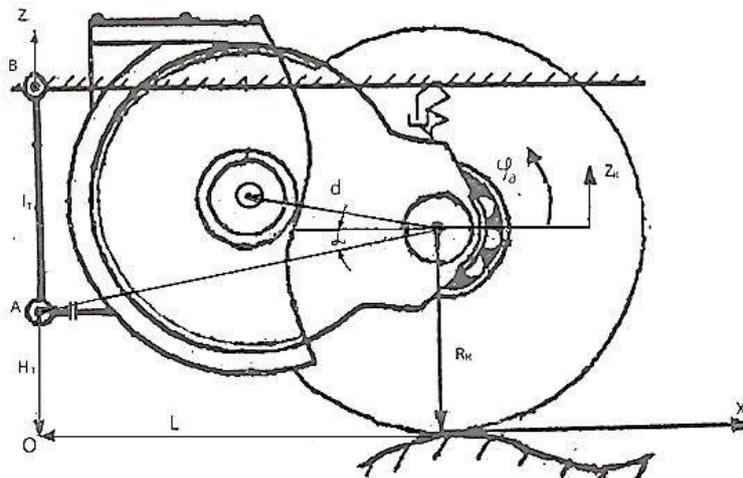


Рисунок 2 – Кинематическая схема КМБ электровоза

Выберем обобщенные координаты: z_k – вертикальные смещения центра тяжести колесной пары; φ_q – поворот тягового двигателя вокруг оси колесной пары.

Математическую модель получим на основе уравнений Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_{q_i} + \sum_{j=1}^k \mu_j R_j, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия; Q_{q_i} – обобщенные силы; μ_j – множители Лагранжа; R_{q_j} – реакция идеальной геометрической связи; q_i – обобщенные координаты.

Так как обобщенные силы Q_{q_i} являются потенциальными на множестве (\bar{q}_i) и кинетическая энергия не зависит от q_i , уравнения (1) можно переписать в следующем виде [6]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^m \mu_j R_{jq_i}. \quad (2)$$

Найдем выражения кинетической T , потенциальной Π энергии и функции рассеяния Φ через обобщенные координаты:

$$T = \frac{1}{2} (m_{\text{кп}} + m_{\text{д}}) \dot{z}_k^2 + \frac{1}{2} (I_{\text{дв}} + m_{\text{д}} d^2) \frac{\varphi_{\text{д}}^2}{2}; \quad (3)$$

$$\Pi = \int_0^{\Delta_p} F_p(\Delta_p) d\Delta_p + \int_0^{\Delta_c} F_c(\Delta_c) d\Delta_c; \quad (4)$$

$$\Phi = \int_0^{V_p} F_{\text{тр}}(V_p) dV_p + \int_0^{V_c} F_{\text{тс}}(V_c) dV_c, \quad (5)$$

где $m_{\text{кп}}$, $m_{\text{д}}$ – массы колесной пары и тягового двигателя соответственно;

$I_{дв}$ – момент инерции ТЭД при вращении вокруг центральной оси;
 F_p, F_c – упругие силы в рессорах и в сайлентблоках подвески ТЭД;
 $F_{тр}, F_{тс}$ – силы трения в системе рессорного подвешивания и сайлентблоках подвески ТЭД;

$\Delta_p, \Delta_c, V_p, V_c$ – прогибы рессор и сайлентблоков и скорости их прогибов соответственно.

Выразим прогиб сайлентблока через обобщенные координаты в системе координат XOZ (рисунок 3). Найдем координаты точки A_1 .

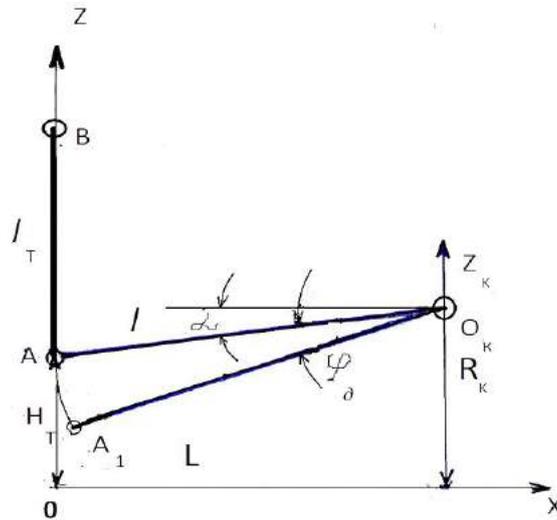


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения величины прогиба упругих элементов подвески ТЭД

Зададим смещение z_k точки O_k и поворот φ_d линии $O_k A$. Точка A займет положение A_1 . При этом смещение по оси OX

$$\Delta_x = L - l \cos(\alpha + \varphi_d) = L - l \cos \alpha \cos \varphi_d + l \sin \alpha \sin \varphi_d \approx l \sin \alpha \varphi_d ; \quad (6)$$

$$X_{A_1} = l \sin \alpha \varphi_d = \varphi_d (R_k - H_T) . \quad (7)$$

Смещение по оси OZ

$$\Delta_z = z_k - l(\sin(\alpha + \varphi_d) - \sin \alpha) \approx$$

$$\approx z_k - l(\sin \alpha + \cos \alpha \varphi_d - \sin \alpha) = z_k - l \cos \alpha \varphi_d = z_k - L \varphi_d ; \quad (8)$$

$$z_A = H_T + z_k - L \varphi_d . \quad (9)$$

Длину отрезка BA_1 обозначим l_{T1} , тогда

$$l_{T1} = \sqrt{\varphi_d^2 (R_k - H_T)^2 + (z_k - L \varphi_d - l_T)^2} . \quad (10)$$

Прогиб упругих элементов в подвеске ТЭД [7]

$$\Delta_c = (l_{T1} - l_T) . \quad (11)$$

Скорость прогиба

$$V_c = \frac{d}{dt} l_{T1} = \frac{\varphi_d \dot{\varphi}_d (R_k - H_T)^2 + (z_k - L \varphi_d - l_T)(\dot{z}_k - L \dot{\varphi}_d)}{l_{T1}} . \quad (12)$$

Прогиб рессоры $\Delta_p = z_k$, скорость ее прогиба $V_p = \dot{z}_k$.

Выражения упругих и диссипативных сил с достаточной степенью точности можно представить линейными зависимостями [1, 8]:

$$F_p(\Delta_p) = \alpha_p \Delta_p; F_{тр} = \beta_p V_p; F_c(\Delta_c) = \alpha_c \Delta_c; F_{тс} = \beta_c V_c. \quad (13)$$

Находим слагаемые уравнения (2):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_k} \right) &= (m_k + m_d) \ddot{z}_k; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_d} \right) &= (I_{дв} + m_d d^2) \ddot{\phi}_d; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial z_k} &= \alpha_p z_k + \alpha_c \Delta_c \frac{\partial \Delta_c}{\partial z_k}; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_k} = \alpha_p \dot{z}_k + \alpha_c V_c \frac{\partial V_c}{\partial \dot{z}_k}; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \phi_d} &= \alpha_c \Delta_c \frac{\partial \Delta_c}{\partial \phi_d}; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_d} = \beta_c V_c \frac{\partial V_c}{\partial \dot{\phi}_d}; \\ \frac{\partial \Delta_c}{\partial z_k} &= \frac{(z_k - L\phi_d - l_T)}{l_{T1}}; \\ \frac{\partial V_c}{\partial \phi_d} &= \frac{\phi_d (R_k - H_T)^2 - L(z_k - L\phi_d - l_T)}{l_{T1}}; \\ \frac{\partial V_c}{\partial \dot{z}_k} &= \frac{1}{l_{T1}} (z_k - L\phi_d - l_T); \\ \frac{\partial V_c}{\partial \dot{\phi}_d} &= \frac{1}{l_{T1}} \left\{ \phi_d (R_k - H_T)^2 - L(z_k - L\phi_d - l_T) \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

После подстановки получаем:

$$\begin{aligned} &(m_k + m_d) \ddot{z}_k + \beta_p \dot{z}_k + \alpha_p z_k + \alpha_c \frac{(l_{T1} - l_T)(z_k - L\phi_d - l_T)}{l_{T1}} + \\ &+ \beta_p \dot{z}_k + \beta_c \frac{\phi_d \dot{\phi}_d (R_k - H_T)^2 + (z_k - L\phi_d - l_T)(z_k - L\dot{\phi}_d)}{l_{T1}} \times \\ &\quad \times \frac{1}{l_{T1}} (z_k - L\phi_d - H_T - l_T) = \mu R_n; \\ &(I_{дв} + m_d d^2) \ddot{\phi}_d + \alpha_c (l_{T1} - l_T) \frac{\phi_d (R_k - H_T)^2 - L(z_k - L\phi_d - H_T - l_T)}{l_{T1}} + \\ &+ \beta_c \frac{\phi_d \dot{\phi}_d (R_k - H_T)^2 + (z_k - L\phi_d - l_T)(\dot{z}_k - L\dot{\phi}_d)}{l_{T1}} \times \\ &\quad \times \frac{1}{l_{T1}} \left[\phi_d (R_k - H_T)^2 - L(z_k - L\phi_d - l_T) \right] = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где R_n – нормальная реакция связи.

При движении локомотива колесно-моторный блок находится под постоянным внешним воздействием со стороны рельсового пути. Наиболее существенное влияние на формирование поля напряжений в материале элементов КМБ оказывают стыковые неровности. Воздействие стыковых неровностей приводит к возникновению приращений для скорости центра тяжести колеса $\Delta \bar{v}_k = \{\dot{x}; \dot{z}\}$ [9].

При этом с достаточной степенью точности можно принять [10]:

$$\dot{x} = \frac{v_{\text{л}}}{2} \sqrt{(4R_k - l_3^2)}; \quad (16)$$

$$\dot{z} = \frac{l_3}{2} \frac{v_{\text{л}}}{R_k}.$$

где l_3 – зазор рельсового стыка;

$v_{\text{л}}$ – скорость локомотива.

Начальные условия при решении дифференциальных уравнений (16) принимаются следующими:

$$z_k = 0; \varphi_{\text{д}} = 0; \dot{z}_k = \dot{z}; \dot{\varphi}_{\text{д}} = 0.$$

Решением полученной системы являются зависимости изменения величин z_k и $\varphi_{\text{д}}$ во времени:

$$z_k = z_k(t); \quad \varphi_{\text{д}} = \varphi_{\text{д}}(t).$$

Используя формулы (10) – (13), найдем значение упругой силы в сайлентблоке подвески ТЭД:

$$F_c = \frac{V_c}{2} \mathcal{J}_c. \quad (17)$$

Сила F_c направлена вдоль вектора \overline{BA}_1 (см. рисунок 3), при этом

$$\overline{BA}_1 = \{\varphi_q (R_k - H_{\text{т}}); (z_k - L\varphi_{\text{д}} - l_{\text{т}})\}.$$

Таким образом, в каждый момент времени определяется векторное силовое поле на площадке сочленения кронштейна и тяги подвески ТЭД.

Знание законов изменения сил в области сочленения тягового двигателя с другими элементами КМБ позволит получить законы распределения напряжений в материале элементов тягового двигателя и дать оценку работоспособности этих элементов.

Список литературы

1. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
2. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями: Руководство по эксплуатации. Ч. 4. Механическое оборудование и системы вентиляции. 2ЭС10.00.000.000 РЭЗ [Текст] / ООО «Уральские локомотивы». – Екатеринбург, 2011. – 97 с.
3. Шантаренко, С. Г. Принципы моделирования динамического поведения подвижного состава [Текст] / С. Г. Шантаренко // Проблемы исследования и проектирования машин: Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. / Пензенская гос. технолог. акад. – Пенза, 2005. – С. 35 – 38.

4. Павленко, А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов [Текст] / А. П. Павленко. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
5. Шантаренко, С. Г. Математическое моделирование напряженного состояния поводка подвески тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6 [Текст] / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрасов // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2015. – № 2. – С. 46 – 51.
6. Динамика контактного взаимодействия упругих тел [Текст] / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3. – С. 24 – 30.
7. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н. И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1961. – 531 с.
8. Беляев, Н. М. Соппротивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
9. Исаев, И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления [Текст] / И. П. Исаев. – М.: Транспорт, 1970. – 183 с.
10. Пахомов, М. П. Оценка уровня импульсного воздействия рельсовых стыков на колесо локомотива [Текст] / М. П. Пахомов, Н. П. Буйнова, И. И. Галиев // Взаимодействие подвижного состава и пути, динамика локомотивов: Межвуз. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Т. 128. Омск, 1971. – С. 9 – 16.

References

1. Biryukov I. V. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, Transport, 1992, 440 p.
2. DC freight locomotive 2ES10 with asynchronous traction motors. Manual. Part 4. Mechanical equipment and ventilation systems. 2ES10.00.000.000 PЭЗ. Ural Locomotives LLC. Ekaterinburg, 2011, 97 p.
3. Shantarenko S. G. Principles of modeling the dynamic behavior of rolling stock [Principy modelirovaniya dinamicheskogo povedeniya podvizhnogo sostava]. *Problemy issledovaniya i proektirovaniya mashin: Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Penza, 2005, pp. 35 – 38.
4. Pavlenko A. P. *Dinamika tigovih privodov magistralnih lokomotivov* (Dynamics of traction drives of mainline locomotives). Moscow: Mashinostroenie, 1991, 192 p.
5. Shantarenko S. G., Kuznetsov V. F., Yurasov O. D. Mathematical modeling of the stress state of the suspension of the traction motor of an electric locomotive 2ES6 [Matematicheskoe modelirovanie napriajonnogo sostoianiiia povodka podvestki tiagovogo elektrovoza 2ES6]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo yuniversiteta pytei soobchenia*, 2015, no. 2, pp. 46 – 51.
6. Shantarenko S. G., Kuznetsov V. F., Ponomarev E. V., Evseev I. L. Dynamics of contact interaction of elastic bodies [Dinamika kontaktnogo vzaimodeistvia uprygih tel]. *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway*, 2013, no. 3, pp. 24 – 30.
7. Bezukhov N. I. *Osnovy teorii uprygosti, plastichnosti i polzuchesti* [Basics of the Theory of Elasticity, Plasticity, and Creep]. Moscow: High School, 1961, 531 p.
8. Belyaev N. M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, 1965, 856 p.
9. Isaev I. P. *Sluchajnye faktory i koehfficient scepleniya* [Random factors and coefficient of adhesion]. Moscow, Transport, 1970, 183 p.
10. Pahomov M. P., Buynova N. P., Galiev I. I. *Ocenka urovnya impul'snogo vozdeystviya rel'sovyh stykov na koleso lokomotiva* [Evaluation of the level of impulse action of rail joints on the locomotive wheel]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* (Interaction of rolling stock and track dynamics of locomotives). T. 128. Omsk, 1971, pp. 9 – 16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе, зав. кафедрой «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

Тел: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Тараненко Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шантаренко, С. Г. Математическое моделирование силовых полей в элементах колесно-моторного блока электровоза серии 2ЭС10 [Текст] / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, В. А. Тараненко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 53 – 60.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shantarenko Sergei Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D., associate Professor, vice-rector, head department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock».

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Kuznetsov Victor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Higher mathematics».

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Taranenko Victor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate of the department « Technologies of transport engineering and repair of rolling stock» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shantarenko S. G., Kuznetsov V. F., Taranenko V. A. Mathematical modeling of force fields in the elements of a wheel-motor block electric series 2ES10. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 53 – 60 (In Russian).

УДК 621.311; 629.423.

М. С. Якубов, З. Г. Мухамедова

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ), г. Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. Рассмотрена электроэнергетическая установка специального самоходного подвижного состава, применяемого в дистанциях электроснабжения, и показана целесообразность ее применения для анализа основных энергетических показателей, в частности, оценки КПД электрогидромеханических установок при раздельном и совместном режиме их работы.

Для оценки энергоэффективности предложен интегральный КПД, позволяющий учитывать энергетические параметры электроустановок, работающих в различных режимах. Даны рекомендации по повышению коэффициента мощности электроустановок.

Ключевые слова: специальный самоходный подвижной состав, оценка, энергетическая эффективность, КПД, электроустановка, блок-схема, электродвигатель, синхронный генератор.

Mirjalil S. Yakubov, Ziyoda G. Mukhamedova

Tashkent Institute of Engineers of Railway Transport (TIERT), Tashkent, Uzbekistan

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF POWER EFFICIENCY OF SPECIAL SELF-PROPELLED RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. Electric power installation of a special self-propelled rolling stock used in the power supply divisions is considered in the paper; the expediency of its use for the analysis of the main energy indices, in particular, the evaluation of the efficiency of electro-hydro-mechanical units at separate and joint operation, is shown.

To assess the energy efficiency, an integrated efficiency factor has been proposed that allows to account the energy parameters of electrical installations operating in various modes. Recommendations have been given to increase the power factor of electrical installations.

Keywords: special self-propelled rolling stock, assessment, energy efficiency, efficiency factor, electrical installation, block-diagram, electric motor, synchronous generator.

По сравнению со странами Западной Европы в России имеется отставание в применении высокопроизводительных технологических комплексов машин и механизмов для строительства, реконструкции и обновления контактной сети, а также средств малой механизации для ремонта и эксплуатации устройств контактной сети, в том числе автомотрис с гидроприемниками и манипуляторами для монтажа конструкций контактной сети; средств и технологий для демонтажа и утилизации отработавших ресурс железнодородных стоек и фундаментов опор контактной сети.

Эффективность функционирования железнодорожного транспорта зависит от того, насколько разрешен вопрос технического состояния контактной сети, подвергающейся статическим, динамическим, циклическим и ударным нагрузкам электроподвижного состава и влиянию резко переменных метеорологических факторов окружающей среды.

Для поддержания регламентированного технического состояния, ремонта и профилактических испытаний контактной сети электрифицированных железных дорог применяется специальный самоходный подвижной состав (ССПС) в виде автомотрис и автодрезин, являющихся объектами исследования энергетической эффективности. Они представляют собой сложную, многоэлементную динамическую систему, работа которой характеризуется тяжелыми эксплуатационными условиями. В этих условиях состояние ССПС непрерывно изменяется в зависимости от времени и режима эксплуатации. Изменение состояния ССПС, как правило, описывается альтернирующим процессом, представляющим собой чередование интервалов времени совместной и раздельной работы механических, гидравлических и электрических установок, режимы которых взаимосвязаны и определяют расход топливно-энергетических ресурсов.

Потребность рыночной экономики требует интенсивного развития энергетической эффективности инфраструктуры железнодорожного транспорта. В настоящее время значительная часть этой инфраструктуры исчерпала свой ресурс и требует поэтапной реконструкции и модернизации для повышения эффективности использования ССПС, сокращения его эксплуатационных расходов и перехода на ресурсосберегающие технологии.

Повышение эффективности потребления дизельного топлива ССПС при проведении обслуживания и ремонта контактной сети является одной из составляющих программы снижения потерь топливно-энергетических ресурсов железных дорог.

Одним из основных показателей энергетической эффективности автотрис является коэффициент полезного действия (КПД), от которого существенно зависят энергозатраты. Ранее сделанные оценки КПД автотрис устарели, так как изменились не только их конструкционные, гидравлические и электромеханические установки, существенно повысился КПД двигателя внутреннего сгорания, синхронного генератора и трехфазных асинхронных электродвигателей, установленных на автотрисе, но и режимы технологии ремонта контактных сетей, обусловленные применением готовых блочных установок контактных подвесок. Все это влияет на КПД и в конечном итоге на расход топлива автотрис.

Оценим в общем виде КПД автотрисы, учитывая составляющие работ двигателя по подъему и повороту монтажной площадки, поворота грузового крана, гидравлического электронасоса и электрогидравлического толкателя.

Энергетическая схема автотрис представляет собой последовательное и параллельное соединение энергопреобразующих установок системы и в виде блок-схемы показана на рисунке 1. Автотриса является автономным подвижным составом, состоящим из двигателя внутреннего сгорания (ДВС) типа ЯМЗ-238Б, приводящего во вращение синхронный генератор (СГ) типа ЕСС-62-4У2. СГ питает трехфазный крановый асинхронный электродвигатель (АД) типа МТФ-012-6 с фазным ротором, АД поворота площадки, АД типа НШ-10 насоса гидравлики и АД типа ТЭ-25 электрогидравлического толкателя [1, 2].

Как видно из рисунка 1, баланс мощностей в разных точках схемы имеет следующий вид: на выходе ДВС или на входе синхронного генератора $P_{СГ}$, на выходе СГ или на входах АД механизма поворота площадки монтажной $P_{ППМ}$, механизма привода насоса гидравлики $P_{ПНГ}$, механизма поворота крана $P_{МПК}$ и электрогидравлического толкателя $P_{ЭГ.Т}$. Вся мощность двигателя внутреннего сгорания автотрисы $P_{ам}$ затрачивается на ход автотрисы $P_{ход}$ и выполнение монтажных, профилактических и ремонтных работ, имеющих суммарную мощность $\sum P_{ЭМУ}$. Следовательно, средневзвешенный КПД автотрисы характеризуется выражением:

$$\eta_{ам} = \frac{P_{ход} + \sum P_{ЭМУ}}{P_{ДВС}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Мощность автотрисы, затрачиваемая только на электрогидромеханическую работу привода $P_{ЭМУ}$, характеризуется выражением:

$$\eta_{ам} = \frac{\sum_i P_{ЭМУ} \eta_i}{P_{ДВС}} = \eta_{ЭГМ} \gamma_i$$

или

$$\eta_{ам} = \frac{\sum_i P_{ЭМУ} \eta_i}{\sum_i \frac{P_{ЭМУ} \gamma_{рп i}}{\eta_{амп i}}} = \frac{1}{\sum_i \frac{\gamma_{рп i}}{\eta_{амп i}}} \eta_{ЭГМ} \gamma_i, \quad (2)$$

где $P_{ЭМУ}$, $P_{ДВС}$, $\eta_{амп i}$ – затраченные мощности и КПД i -го электродвигателя автотрисы;

$\gamma_{рп i}$, $\eta_{амп i}$ – доли затраченной и полезной мощностей i -го электродвигателя в соответствующей общей мощности автотрисы.

Анализ выражения (2) с учетом блок-схемы основных энергоустановок на рисунке 1 показывает следующее: средневзвешенный КПД каждой энергоустановки зависит от КПД связанной с ней группы исполнительных двигателей и распределения мощности между ними.

Чем больше КПД отдельной энергоустановки и чем больше доля мощности, приходящаяся на установку с высоким КПД, тем выше средневзвешенный КПД данной группы установок. Поскольку общий КПД энергетической цепи зависит от произведения средневзвешенных КПД последовательно соединенных энергоустановок, то чем больше средневзвешенные КПД группы установок, соединенных параллельно, тем выше общий КПД автомотрисы.

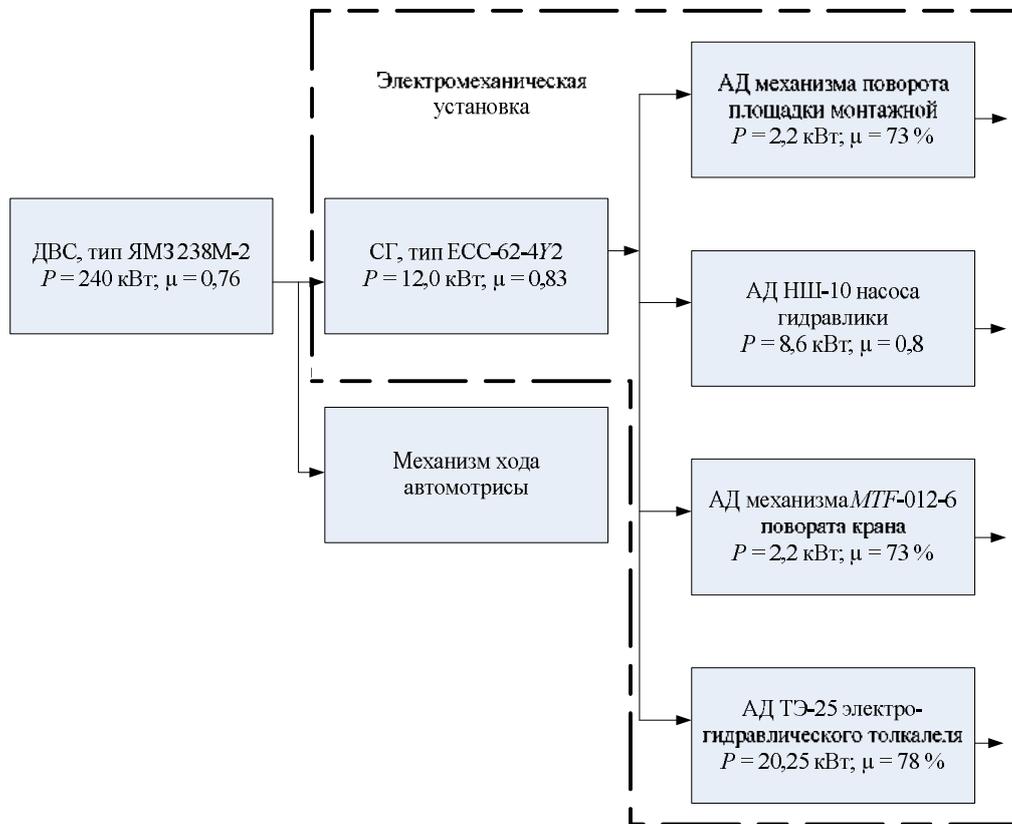


Рисунок 1 – Блок-схема основных энергоустановок автомотрисы

Обобщенный КПД энергоустановок (ДВС, синхронного генератора и группы АД), соединенных последовательно, как известно, равен произведению частных КПД:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{двс}} \cdot \eta_{\text{СГ}} \cdot \eta_{\text{ЭМУ}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{двс}}$ – КПД двигателя внутреннего сгорания; $\eta_{\text{СГ}}$ – КПД синхронного генератора; $\eta_{\text{ЭМУ}}$ – средневзвешенный КПД электромеханической установки.

Средневзвешенный КПД электромеханической установки автомотрисы (см. рисунок 1) характеризуется выражением:

$$\eta_{\text{ЭМУ}} = \frac{\sum_{i=1} P_{\text{АД}i} t_i}{P_{\text{СГ}} \sum t_i} = \frac{P_{\text{ППМ}} t_{\text{ППМ}} + P_{\text{ПНГ}} t_{\text{ПНГ}} + P_{\text{ППК}} t_{\text{ППК}} + P_{\text{ЭГТ}} t_{\text{ЭГТ}}}{P_{\text{СГ}} (t_{\text{ППМ}} + t_{\text{ПНГ}} + t_{\text{ППК}} + t_{\text{ЭГТ}})}, \quad (4)$$

где $P_{\text{СГ}}, P_{\text{ППМ}}, P_{\text{ПНГ}}, P_{\text{ППК}}, P_{\text{ЭГТ}}$ – соответственно номинальные мощности синхронного генератора, привода площадки монтажной, привода насоса гидравлики, привода поворота крана и привода электрогидравлического толкателя; 2 – коэффициент учета приемников во время ожидаемого максимума нагрузки при $t \geq 0,5$ ч.

Подставляя в выражение (4) значения мощности установленных двигателей и средние хронометрические значения времени работы каждого АД, например, при подготовке к характерному осенне-зимнему периоду за третьи кварталы отдельно по 2016 – 2018 гг., полученные по материалам Отдела железнодорожной техники Управления механизации «Железные дороги Узбекистана», приведенные в таблице 1, и с учетом того, что одновременная работа краном поворота и монтажной площадки запрещена [2,7], получим:

при работе без крана поворота –

$$\eta_{ЭМУ} = \frac{2,2 \cdot 37,3 + 8,6 \cdot 66,3 + 0,25 \cdot 66,6}{12(37,3 + 66,3 + 66,6)} \cdot 100 \% = 65,5 \%;$$

при работе без монтажной площадки –

$$\eta_{ЭМУ}'' = \frac{8,6 \cdot 66,3 + 2,2 \cdot 30,6 + 0,25 \cdot 66,6}{12(66,3 + 30,2 + 66,6)} \cdot 100 \% = 66,68 \%.$$

Таблица 1 – Хронометрические значения времени работы электродвигателей при характерной подготовке к осенне-зимнему периоду

Виды электропривода	Синхронный генератор ЕСС-62-4У2, ч $P = 12$ кВт; $\eta = 0,8$; $m = 238$ кг	Электродвигатель площадки монтажной, ч $P = 2,2$ кВт; $\eta = 0,77$; $n = 1500$ об/мин; $\cos \varphi = 0,79$	Электродвигатель НШ-10 привода насоса гидравлики, ч $P = 8,6$ кВт; $\eta = 0,8$; $\eta = 2400$ об/мин; $m = 2,58$ кг; $\cos \varphi = 0,92$	Электродвигатель поворота крана МТФ-012- 6, ч $P = 2,2$ кВт; $\eta = 0,73$; $n = 895$ об/мин; $\cos \varphi = 0,76$	Электродвигатель ТЭ-25 толкателя гидравлики, ч $P = 0,25$ кВт; $n = 2800$ об/мин; $m = 8,8$ кг; $\cos \varphi = 0,82$; $\eta = 0,78$
За третьи кварталы года					
2016	66,0	36,0	66,0	30,0	66,0
2017	69,0	39,0	69,0	33,0	69,0
2018	66,0	37,0	64,0	29,0	65,0
Среднее за квартал	67,0	37,3	66,3	30,6	66,6

Уместно напомнить, что из-за трудности определения технологического графика более 22 видов работ по техническому обслуживанию и ремонту, выполняемых автотрисой всеми электродвигателями, имеющими различную загрузку, расчетную мощность синхронного генератора целесообразно определять по формуле [6]:

$$P_{\text{расч}} = \sum_1^n \frac{P_y k_3}{\eta_n} + \sum_1^m \frac{P'_y k_3 t}{0,5 \eta_m}, \quad (5)$$

где P_y – установленная мощность каждого из приемников, работающих во время ожидаемого максимума нагрузки при $t > 0,5$ ч, кВт; η – КПД электроприемника; k_3 – коэффициент загрузки; P'_y – установленная мощность каждого из m приемников, участвующих в формировании максимальной нагрузки и работающих во время максимума менее 0,5 ч, кВт; t – длительность непрерывной работы каждого из электроприемников с мощностью P' ($t < 0,5$ ч).

Полученное выше значение средневзвешенного КПД электромеханической части автотрисы $\eta_{ЭМУ}$ по формуле (4) показывает, что установленные мощности синхронного генератора и группы трехфазных АД в целом соответствуют нагрузочным диаграммам и перегрузочным способностям ее электромеханической части.

Для улучшения энергетической эффективности электроприводов целесообразно для каждого установленного АД предусмотреть повышение $\cos \varphi$ путем соединения специальных компенсирующих конденсаторов по схеме, представленной на рисунке 2.

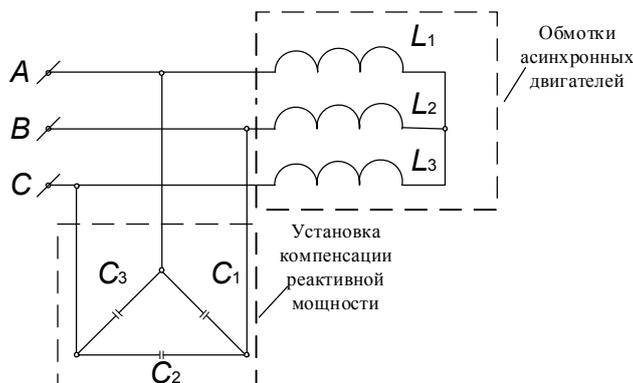


Рисунок 2 – Схема подключения компенсирующих конденсаторов C_1, C_2, C_3 к обмоткам АД

Величина компенсирующих конденсаторов $C_1 = C_2 = C_3 = C$, соединенных по схеме «треугольника», рассчитывается отдельно для каждого электродвигателя по формуле [5]:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega U^2}, \quad (6)$$

где P – мощность двигателя, Вт; φ_1 – угол сдвига вектора тока относительно напряжения, задаваемый через $\cos \varphi$ двигателя; $\varphi_2 = \arccos 0,96$ – сдвиг фазы тока двигателей относительно напряжения, соответствующий рекомендуемому $\cos \varphi$ по ПУЭ; ω – угловая частота, рад/с; U – номинальное линейное напряжение двигателя, В.

Расчетные величины указанных конденсаторов и токов АД приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные величины токов электродвигателей до и после включения компенсирующих конденсаторов

Мощность и $\cos \varphi$ АД	C , мкФ	Токи АД до и после включения конденсаторов, А
Площадки монтажной – $P = 2,2$ кВт, $\cos \varphi = 0,79$	23,0	7,32/6,03
Насоса гидравлики – $P = 8,6$ кВт, $\cos \varphi = 0,92$	24,0	24,59/23,57
Поворота экрана – $P = 2,2$ кВт, $\cos \varphi = 0,76$	27,0	7,61/6,032
Электрогидравлического толкателя, $P = 0,25$ кВт, $\cos \varphi = 0,82$	2,24	0,80/0,68

По результатам расчета видно, что подсоединение компенсирующих конденсаторов к исполнительным двигателям приводит к уменьшению статорных токов электродвигателей до 20 %.

Из приведенных расчетов вытекает, что при разработке новых типов автотрис или модернизации существующих возникает вопрос выбора типа его электроприводов и питающего синхронного генератора, имеющих завышенные мощности [1, 2]. Для более обобщенного определения эффективности электрических приводов ССПС целесообразно использовать интегральный КПД, дающий возможность определять их оптимальные параметры. Интегральный КПД определяется на основе вероятности работы привода в различных режимах по формуле [3, 8]:

$$Z(M, n) = \frac{\sum_{i=1}^n t(M_i, n)}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1} t(M_i, n)$ – суммарное время работы привода в (M, n) -м режиме работы, ч; $\sum t_i$ – суммарное время работы электроприводов; $M_i = \frac{\dot{P}_{ni}}{\omega_{ni}}$ – электромагнитный момент, Нм, рассчитываемый по формуле

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (8)$$

$\dot{P}_{ni}, \omega_{ni}$ – номинальные мощность и угловая частота i -го электродвигателя; n – частота вращения, об/мин;

Затраты при эксплуатации ССПС определяются по выражению [4]

$$Z_{\text{экс}} = Z_{\text{п}} + Z_{\text{эзм}} + Z_{\text{тор}}, \quad (9)$$

где $Z_{\text{п}}$ – затраты на движение ССПС, руб.; $Z_{\text{эзм}}$ – затраты по работе электроприводов электрических, гидравлических и механических установок, руб.; $Z_{\text{тор}}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт ССПС, руб.

Общими затратами для ССПС являются расходы на горюче-смазочные материалы, зависящие от режима работы:

$$Z_{\text{гсм}j} = \frac{Mn}{\eta_j} t_j \Pi_{\text{гсм}} = \frac{Mn}{\eta_j} Z_j \Pi_{\text{гсм}} T_i, \quad (10)$$

где η_j – мгновенный КПД; t_j – время работы в j -м режиме, ч; $\Pi_{\text{гсм}}$ – приведенная цена горюче-смазочных материалов, руб.; Z_j – вероятность работы привода СГ в j -м режиме; $\sum T_i$ – время работы приводов автотрисы, ч.

Анализ хронометрических измерений времени работы каждой установки автотрисы показывает [8], что для предварительной оценки мгновенный КПД привода можно заменить его энергетическим фактором. Такая замена позволяет оценить его эффективность без расчета КПД привода СГ, работающего, как показывает расчет по формуле (2), в режиме неполной мощности [7].

С учетом сказанного можно получить [4]:

$$Z_{\text{гсм}j} = \frac{Mn}{P_j F_j} t_j \Pi_{\text{гсм}} = \frac{Mn}{PF} Z_j \Pi_{\text{гсм}} T_i, \quad (11)$$

где $P_j F_j$ – энергетический фактор работы каждого электропривода в различных режимах, рассчитываемый по данным таблицы 1.

Затраты ССПС за время установленных работ определяются выражением, руб.:

$$Z_{\text{гсм}} = \Pi_{\text{гсм}} T \sum_{F=0}^{M_{\text{max}}} \sum_{n=-n_{\text{кон}}}^{M_{\text{кон}}} \left(\frac{Z_{\text{гсм}} Mn}{PF} \right) = \frac{M_{\text{max}} n_{\text{кон}}}{\int \eta} \Pi_{\text{гсм}} T, \quad (12)$$

где $n_{\text{кон}}$ – конструктивная скорость двигателя каждой установки, об/мин;

$\int \eta$ – интегральный КПД автотрисы определяется соотношением

$$\int \eta = \frac{M_{\text{max}} n_{\text{кон}}}{\sum_{M=0}^{M_{\text{max}}} \sum_{n=-n_{\text{кон}}}^{n_{\text{кон}}} \left(\frac{Z_{\text{гсм}} Mn}{PF} \right)}. \quad (13)$$

Выражение (13) характеризует интегральный КПД как с точки зрения использования максимальной мощности каждой установки, так и с позиции использования их в различных недоиспользованных режимах, поскольку $T, M_{\max}, n_{\text{кон}}$ есть величины, не зависящие от типа приводов и режимах эксплуатации ССПС [10]. Укажем, что интегральный КПД – величина относительная и объект всегда работает при конструкционной скорости движения с различной нагрузкой. Таким образом, интегральный КПД учитывает не только КПД электрического привода, но и режим эксплуатации автотрисы [9], т. е. он является составной частью критерия текущих затрат на эксплуатацию ССПС.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный критерий оценки энергоэффективности ССПС – интегральной КПД – позволяет учитывать не только энергетические параметры электрических приводов (КПД и $\cos \varphi$ двигателей) при различных режимах работы, но и режим эксплуатации ССПС.

2. Интегральный КПД целесообразно использовать при разработке новых типов и использовании реконструированных ССПС с целью уменьшения расхода топлива и экономии других ресурсов.

3. Подсоединение компенсирующих конденсаторов к установленным двигателям уменьшает ток статорных обмоток до 20 %.

Список литературы

1. Инструкция по автотрисе дизельная монтажная АДМ-1: Руководство к эксплуатации 77.020-00.00.000 РЭ [Текст] / ОАО «Тихорецкий машиностроительный завод им. В. В. Воровского». – М., 2003. – 26 с.

2. Инструкция по эксплуатации и содержанию дрезин, мотовозов и автотрис на железных дорогах АО «Узбекистон темир йуллари» №388-Н [Текст]. – Ташкент: Темир йулчи. – 2014. – 44 с.

3. Тяговый привод для скоростного подвижного состава [Текст] / Б. Г. Любарский, Д. Ю. Зюзин и др. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Збірник наукових праць. Нові рішення в сучасних технологіях. – 2006. – № 42. – С. 72 – 77.

4. Ефанов, А. Н. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте [Текст] / А. Н. Ефанов / ПГУПС.– СПб. – 2001. – 149 с.

5. Зевенке, Г. В. Основы теории цепей: Учебник [Текст] / П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

6. Епифанов, А. П. Основы электропривода: Учебное пособие. [Текст] / А. П. Епифанов. – СПб: Лань, 2009. – 192 с.

7. Basic Probability Theory. Robert. B.Ash. University of Illinois. New York, 2008. *Poisson Process*, pp 197 – 200.

8. Mukhamedova Z. G., Khromova G. A., Yutkina I. S. Mathematical Model of Oscillations of Bearing Body Frame of Emergency and Repair Railcar, *Journal «Transport Problems»*, no 12, 2017, pp. 93 – 103.

9. Popa G., Badea C. et al. Dynamic Oscillations Features of the Br 185 Locomotive Series. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2016, no.1, pp. 66 – 73.

10. Mukhamedova Z. G., Yakubov M. S. Analysis of Optimal Periodicity of Preventive Maintenance of Rail Service Car Taking into Account Operational Technology. *European science review*. 2018. pp. 167 – 171.

References

1. *Instruktsiya po avtomotrise dizelnaya montazhnaya ADM-1, rukovodstvo k ekspluatatsii 77.020-00.00.000 RE* (Instruction for Rail Service Car, ADM-1 Diesel Assembly Type, Manual for Operation of 77.020-00.00.000 RE). Russia, JSC «V. V.Vorovsky Tikhoretsk Machine-Building Plant» 2003.

2. *Instruktsiya po ekspluatatsii i sodержaniyu drezin, motovozov i avtomotris na zheleznyih dorogah AO «Uzbekiston temir yullari» №388 – N* (Instructions for Use and Maintenance of Hand-

cars, Railway Vehicles and Rail Service Cars on the Railways of JSC «Uzbekistan Railways» no. 388–N), 2014.

3. Lyubarsky B. G. Traction Drive for High-Speed Rolling Stock [Tyagovyyi privod dlya skorostnogo podvizhnogo sostava]. *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute Proc.* 2006. no. 42, pp.72 – 77.

4. Efanov A. N. Evaluation of Economic Efficiency of Investment and Innovation in Railway Transport [Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti investitsiy i innovatsiy na zheleznodorozhnom transporte]. Saint Petersburg. 2001, 149 p.

5. Zevenke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. *Osnovyi teorii tsepey* (Basics of the Theory of Chains). Moscow: Energoatomizdat, 1989. 528 p.

6. Epifanov A. P. *Osnovyi elektroprivoda* (Fundamentals of the Electric Drive: the manual). 2 ed., Saint Petersburg: Lan publishing house, 2009. 192 p.

7. Basic Probability Theory. Robert. B.Ash. University of Illinois. New York, 2008. *Poisson Process*, pp 197 – 200.

8. Mukhamedova Z. G., Khromova G. A., Yutkina I. S. Mathematical Model of Oscillations of Bearing Body Frame of Emergency and Repair Railcar, *Journal «Transport Problems»*, no 12, 2017, pp. 93 – 103.

9. Popa G., Badea C. et al. Dynamic Oscillations Features of the Br 185 Locomotive Series. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2016, no.1, pp. 66 – 73.

10. Mukhamedova Z. G., Yakubov M. S. Analysis of Optimal Periodicity of Preventive Maintenance of Rail Service Car Taking into Account Operational Technology. *European science review*. 2018. pp. 167 – 171.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубов Миржалил Сагатович

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Мирабадский район, ул. Адилходжаева., д. 1, г. Ташкент, 100067, Узбекистан.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог», ТашИИТ.

Тел.: +9989 (71) 299-05-14.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Мухамедова Зиеда Гафурджановна

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Мирабадский район, ул. Адилходжаева., д. 1, г. Ташкент, 100067, Узбекистан.

Кандидат технических наук, докторант кафедры «Транспортная логистика и сервис», ТашИИТ.

Тел.: +9989 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Якубов, М. С. Анализ и оценка энергетической эффективности специального самоходного подвижного состава железной дороги [Текст] / М. С. Якубов, З. Г. Мухамедова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 60 – 68.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakubov Mirjalil Sagatovich

Tashkent Institute of Engineers of Railway Transport (TIERT).

Mirabad distarict, Adilhodjaev st., 1, Tashkent, 100067, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «», TIERT.

Phone: +9989 (71) 299-05-14.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent Institute of Engineers of Railway Transport (TIERT).

Mirabad distarict, Adilhodjaev st., 1, Tashkent, 100067, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Transport Logistic and Service», TIERT.

Phone: +9989 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yakubov M. S., Mukhamedova Z. G., Analysis and Assessment of Power Efficiency of Special Self-Propelled Railway Rolling Stock. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 60 – 68 (In Russian).

УДК 621.332.33(043)

А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава

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

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ОПОРЫ НА ВЫСОТУ ПОДВЕСА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ОТНОСИТЕЛЬНО УРОВНЯ ГОЛОВКИ ДЛЯ СКОРОСТНЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК

***Аннотация.** В статье рассмотрено влияние угла наклона опоры на положение контактного провода относительно уровня головки рельса. Предложено учитывать изменение состояния опорно-поддерживающих конструкций в конечном расчете статических параметров контактной подвески на скоростных и высокоскоростных участках железнодорожных магистралей.*

***Ключевые слова:** консоль контактной сети, опора, контактная подвеска, высокоскоростной и скоростной железнодорожный транспорт, несущий трос, контактный провод, угол наклона опоры*

Alexander G. Galkin, Alexey A. Kovalev, Alexander V. Mikava

Ural State Transport University (USTU), Ekaterinburg, the Russian Federation

THE EFFECT OF POLE'S ANGLE INCLINATION ON CONTACT WIRE POSITION RELATIVE TO THE LEVEL OF THE RAIL HEAD FOR SPEEDS AND HIGHSPEEDS CATENARIES

***Abstract.** The article describes how the inclination angle of a pole affects the position of contact wire relative to the level of the rail head. It is proposed to take into account a change in position of supporting constructions on the static parameters of catenary in high-speed Railways.*

***Keywords:** cantilever, contact-line support, catenary, high-speed railway transport, suspension cable, contact wire, inclination angle of a pole.*

В рамках решения задачи по повышению надежности устройств электроснабжения большое внимание уделяется обеспечению стабильной работы элементов контактной сети, влияющих на качество токосъема.

Приведем основные статические параметры контактной подвески, которые являются неотъемлемой частью при взаимодействии токоприемника с контактным проводом:

- расстояние от уровня головки рельса (УГР) до контактного провода;
- разница высот контактного провода от УГР в опорных узлах при смежных опорах.

Указанные параметры подвески должны соответствовать утвержденным проектным нормам при высокоскоростном и скоростном движении поездов [1].

На рисунке 1 изображена горизонтальная консоль контактной сети с обозначениями составных частей для расчета ее параметров.

Для оценки влияния угла наклона опоры на статические параметры контактной подвески приведем формулу для расчета расстояния от контактного провода до УГР:

$$H_{к.п} = H_{н.т i} - H_{к.в i} \quad (1)$$

где $H_{н.т i}$ – высота несущего троса от УГР на i -й опоре, мм; $H_{к.в i}$ – конструктивная высота контактной подвески на i -й опоре, мм.

Поворотный зажим для крепления несущего троса монтируется на горизонтальный стержень консоли.

Расстояние от УГР до несущего троса рассчитывается относительно точки установки консоли по формуле:

$$H_{н.т.i} = H_{н.к.i} + H_{б.i} + H_{п.з.i}, \quad (2)$$

где $H_{н.к.i}$ – расстояние от УГР до точки монтажа нижнего консольного хомута на i -й опоре, мм; $H_{б.i}$ – база консоли (расстояние между верхним и нижним узлами крепления) на i -й опоре, мм; $H_{п.з.i}$ – высота поворотного зажима несущего троса на i -й опоре, мм.

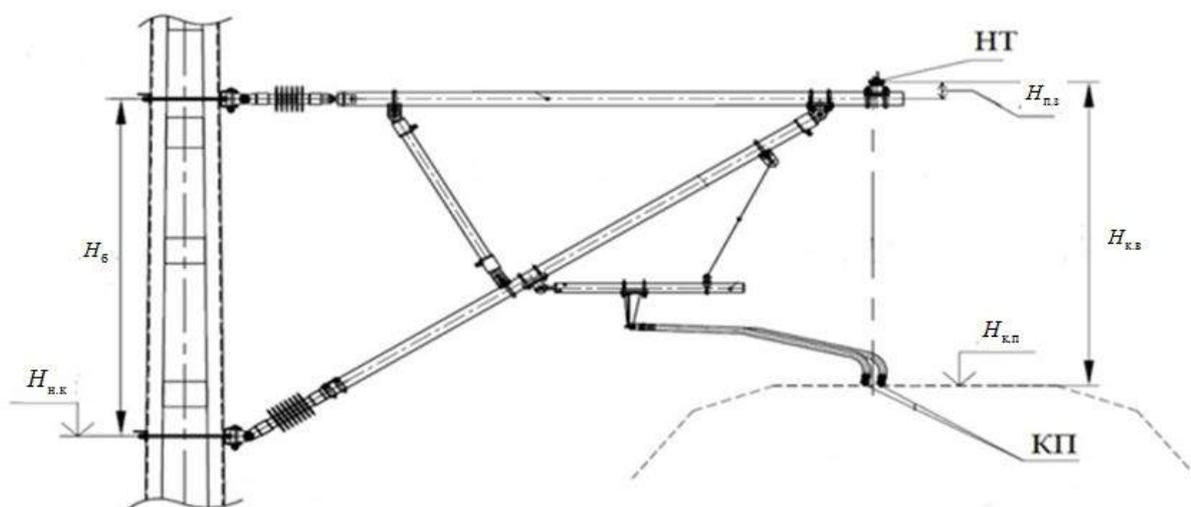


Рисунок 1 – Горизонтальная консоль контактной сети с условными обозначениями

Подставив уравнение (2) в (1), получим формулу, которая позволяет рассчитать высоту подвеса контактного провода, учитывая геометрические и установочные параметры опорно-поддерживающих конструкций:

$$H_{к.п.i} = H_{н.к.i} + H_{б.i} + H_{п.з.i} - H_{к.в.i}. \quad (3)$$

Разницу высоты контактных проводов от УГР в узлах на смежных опорах запишем в виде:

$$\Delta H_{к.п.i(i+2)} = H_{к.п.i} - H_{к.п.i\pm 2}, \quad (4)$$

где $H_{к.п.i}$ – высота контактного провода от УГР на i -й опоре, мм; $H_{к.п.i\pm 2}$ – высота контактного провода от УГР на смежной опоре, мм ($i \pm 2 > 0$).

Итоговое выражение для определения высоты контактного провода от УГР с учетом возвышения рельса имеет вид:

$$H_{к.п.i} = H_{н.к.i} + H_{б.i} + H_{п.з.i} - H_{к.в.i} + h_p, \quad (5)$$

где h_p – возвышение рельса (имеет знак «+», если левый рельс выше правого при рассмотрении пути по ходу возрастания пикетажа, знак «-», если правый рельс выше левого).

Расчет разницы высот контактного провода от УГР на смежных опорных узлах запишется в виде:

$$H_{к.п.i} = H_{к.п.i} - H_{к.п.i\pm 2}. \quad (6)$$

На рисунке 2 изображена опора контактной сети, которая наклонена в сторону поля. При этом угол наклона влияет на итоговое значение основного статического параметра контактной подвески (КП) [2]. На скоростных и высокоскоростных магистралях конструктивная высота контактной подвески должна быть постоянной по всей длине пролета [3]. В связи с этим при расчетах приняты следующие допущения:

- конструктивное исполнение консоли – горизонтального типа;
- центр вращения опоры расположен на пересечении ее оси с условным обрезом фундамента.

Когда опора не наклонена, то она образует прямой угол с горизонтальным стержнем консоли в треугольнике AMF , где $\angle M = 90^\circ$, точка F – точка крепления несущего троса.

Из рисунка 2 видно, что при наклоне опоры точка крепления несущего троса меняет свое положение по высоте на величину, равную длине отрезка DE .

На рисунке три прямоугольных треугольника: первый – $\triangle ABC$ ($\angle B = 90^\circ$), второй – $\triangle BED$ ($\angle E = 90^\circ$), третий – $\triangle BMC$ ($\angle M = 90^\circ$). Для наглядности на рисунке 3 приведено расположение данных треугольников относительно друг друга. У треугольников BED и BMC : $\angle M = \angle E = 90^\circ$, а угол B – общий.

Следовательно, $\angle C = \angle$. Также у треугольников ABC и BED : $\angle ABC = \angle BED = 90^\circ$. Ранее доказано, что $\angle ACB = \angle BDE$, значит, $\angle CAB = \angle DBE$, при этом $\angle CAB$ – угол наклона опоры, который для удобства обозначим α .

Катет DE прямоугольного треугольника BED является величиной, на которую изменяется точка подвеса несущего троса относительно УГР ввиду наклона опоры в сторону поля.

Гипотенуза BD треугольника BED – расстояние от центральной оси опоры до точки крепления несущего троса вдоль горизонтального стержня консоли.

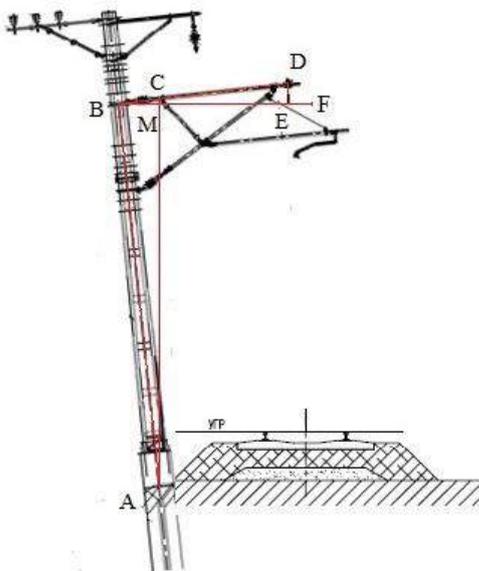


Рисунок 2 – Опора наклонена в сторону поля

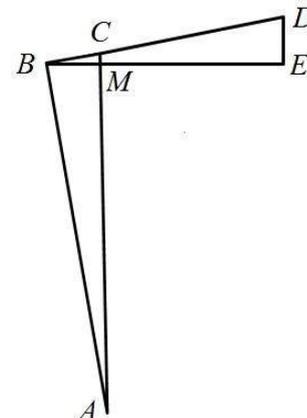


Рисунок 3 – Схема взаимного расположения прямоугольных треугольников

Запишем уравнение для определения изменения точки крепления несущего троса ($h_{у\text{ поле}}$) ввиду наклона опоры в сторону поля:

$$h_{у\text{ поле}} = L_{\text{кон}} \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

где $L_{\text{кон}}$ – расстояние от центральной оси опоры до точки крепления несущего троса вдоль горизонтального стержня консоли, мм; α – угол наклона опоры, градусы.

В соответствии с Нормами ... [3] наклон опоры для скоростных участков контактной сети в сторону пути не допускается, а наклон опор в сторону поля и вдоль пути не должен превышать 0,5 % от всей длины опоры. Формула для перевода углов наклона из процентов в градусы имеет вид:

$$\alpha_{\text{град}} = \arctg(\alpha_{\text{проц}} / 100 \%), \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{проц}}$ – угол наклона опоры, %.

Подставив формулу (8) в уравнение (7), получим итоговую математическую модель для определения высоты контактного провода от УГР с учетом угла отклонения опоры в сторону поля:

$$H_{\text{к.п.}i} = H_{\text{н.к.}i} + H_{\delta i} + H_{\text{п.з.}i} - H_{\text{к.в.}i} + h_{\text{п}} + h_{\text{у.поле}}. \quad (9)$$

Для того чтобы учесть в математической модели угол наклона опоры вдоль пути, обратимся к рисунку 4, на котором изображена наклонившаяся вдоль пути опора.

Если опора на рисунке 4 наклонится влево, то рисунок будет изображен зеркально. Расстояние от УГР до точки крепления несущего троса на консоли при прямой опоре равно AB , а при наклонившейся – AC . Наклон опоры образует равнобедренный треугольник ABC и прямоугольные треугольники BMC и AMC , где катет BM – значение изменения высоты подвеса несущего троса вследствие наклона опоры. Для наглядности на рисунке 5 приведено отдельное изображение равнобедренного треугольника ABC .

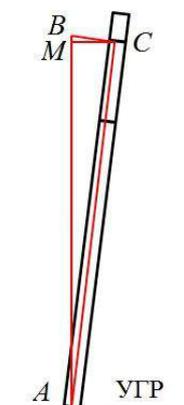


Рисунок 4 – Опора, наклонившаяся вдоль пути

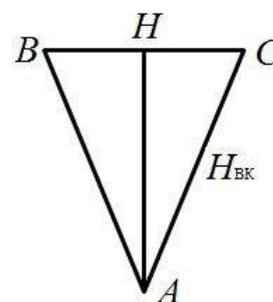


Рисунок 5 – Равнобедренный треугольник ABC

В треугольнике ABC проведем биссектрису AH , которая делит угол наклона опоры (α) пополам, в равнобедренном треугольнике она является медианой и высотой, а также образует прямоугольный треугольник AHC . Отрезок AH определяется по формуле:

$$AH = H_{\text{в.к}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (10)$$

где $H_{\text{в.к}}$ – боковая сторона AC равнобедренного треугольника ABC , равная расстоянию от УГР до точки крепления несущего троса на консоли, мм.

Запишем формулу для расчета катета HC прямоугольного треугольника AHC :

$$HC = \sqrt{H_{\text{в.к}}^2 - (H_{\text{в.к}} \cdot \cos \frac{\alpha}{2})^2}, \quad (11)$$

где $H_{в.к}$ – боковая сторона AC равнобедренного треугольника ABC , равная расстоянию от УГР до точки крепления несущего троса на консоли, мм; α – угол наклона опоры, градусы.

Основание BC равнобедренного треугольника запишется следующим образом:

$$BC = 2 \cdot HC = 2 \sqrt{H_{в.к}^2 - (H_{в.к} \cdot \cos \frac{\alpha}{2})^2}. \quad (12)$$

Запишем формулу для расчета катета MC прямоугольного треугольника AMC :

$$MC = H_{в.к} \sin \alpha, \quad (13)$$

где $H_{в.к}$ – боковая сторона AC равнобедренного треугольника ABC , равная расстоянию от УГР до точки крепления несущего троса на консоли, мм; α – угол наклона опоры, градусы.

Запишем формулу для расчета катета BM прямоугольного треугольника BMC :

$$BM = \sqrt{BC^2 - MC^2}, \quad (14)$$

где BC – гипотенуза прямоугольного треугольника BMC , мм; MC – катет прямоугольного треугольника BMC , мм.

Подставив формулы (12) и (13) в (14), получим значение изменения высоты подвеса несущего троса вследствие наклона опоры вдоль пути:

$$h_{у\text{ вдоль}} = \sqrt{4[H_{в.к}^2 - (H_{в.к} \cdot \cos \frac{\alpha}{2})^2] - (H_{в.к} \cdot \sin \alpha)^2}. \quad (15)$$

Введя формулу (15) в уравнение (9), получим итоговое выражение для определения высоты контактного провода от УГР с учетом угла отклонения опоры вдоль пути:

$$H_{к.п i} = H_{н.к i} + H_{б i} + H_{п.з i} - H_{к.в i} + h_p - h_{у\text{ поле}}. \quad (16)$$

На основании сказанного можно сделать выводы, что предложенные расчеты доказывают, что наклон опоры вдоль пути влияет незначительно: при значении угла, равном 0,5 % от длины опоры, расстояние от УГР до контактного провода уменьшается на 1 мм, но при аналогичном значении угла наклона опоры в сторону поля высота контактного провода от УГР увеличивается уже на 11 мм, что в свою очередь недопустимо для участков со скоростью движения подвижного состава свыше 250 км/ч.

Разработанные авторами формулы (9) и (16) позволяют получить реальные значения статических параметров контактной подвески с учетом угла наклона в сторону поля и вдоль пути соответственно и оперативно определить требуемое положение для подвеса несущего троса и контактного провода, например, после выправки опоры, что обеспечивает возможность продления жизненного цикла устройствам контактной сети [4].

Учет отклонения параметров контактной подвески от нормы немаловажен при волновых процессах в контактных подвесках [5]. При этом необходимо использовать современные технологии при производстве строительно-монтажных работ на опорных и поддерживающих конструкциях контактной сети [6 – 8]. Появляется возможность повысить безопасность производства работ, так как процесс измерений происходит со стороны поля и нет необходимости использовать вагон-лабораторию контактной сети (ВИКС), что выгодно экономически.

Список литературы

1. Микава, А. В. Обеспечение требуемых статических параметров скоростных и высокоскоростных контактных подвесок на этапах жизненного цикла [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Микава Александр Ваноевич. – Екатеринбург, 2017. – 157 с.
2. Ковалев, А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ковалев Алексей Анатольевич. – Екатеринбург, 2008. – 234 с.
3. СТН ЦЭ 12-00. Нормы по производству и приемке строительных и монтажных работ при электрификации железных дорог (устройства контактной сети) [Текст] / Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М.: Трансиздат, 2000. – 88 с.
4. Микава, А. В. Расчет продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети [Текст] / А. В. Микава // Транспортное дело России. – 2015. – № 5. – С. 150 – 152.
5. Смердин, А. Н. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели [Текст] / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1. – С. 30 – 37.
6. Микава, А. В. Разработка способа монтажа поддерживающих конструкций на опоре контактной сети [Текст] / А. В. Микава // Научное обозрение. – 2014. – № 10 (ч. 1). – С. 60 – 62.
7. Комплексное внедрение инноваций на железнодорожном транспорте России [Текст] / А. А. Ковалев, А. В. Микава и др. // Транспортное дело России. – 2013. – № 4 (107). – С. 24 – 26.
8. Галкин, А. Г. Мониторинг инфраструктурного комплекса системы токосъема в процессе эксплуатации [Текст] / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава // Инновационный транспорт / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2012. – № 1(2). – С. 44 – 48.

References

1. Mikava A. V. *Obespechenie trebyemykh staticheskikh parametrov skorostnykh i vysokoskorostnykh kontaknykh podvesok na etapah zhiznennogo cikla* (Provision of required static parameters of speed and highspeed catenary during the life cycle). PhD thesis, Ekaterinburg, 2017, 157 p.
2. Kovalev A. A. *Formirovanie uprovlyaushih vozddeistvii na kontaktnoi seti s uchetom processa razregulirovok opor* (Formation of control actions on overhead system subject to disadjustment of poles). PhD thesis, Ekaterinburg, 2008, 234 p.
3. *Normy po proizvodstvu i priemke stroitelnykh i montazhnykh rabot pri elektrifikatsii zheleznnykh dorog (ustroystva kontaktnoi seti), STN CE 12-00. Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya MPS RF* (Standards for manufacturing and reception of construction and installation works during railway electrification (overhead system devices) Department of Russian railway electrification). Moscow, 2000, 88 p.
4. Mikava A.V. The life cycle calculation of cantilevers [Raschet prodolzhitelnosti zhiznennogo cikla konsoly kontaktnoi seti]. *Transportnoe delo Rossii – The transport business of Russia*, 2015, no. 5, pp. 150 – 152.
5. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Zhdanov V. A. Improving the methodology research of wave processes for overhead system on the basis of finite element model [Sovershenstvovanie metodiki issledovaniya volnovykh processov v kontaktnoi podveske na osnove konechno-elementnoi modeli]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 1, pp. 30 – 37.

6. Mikava A.V. The development of installation cantilevers method on overhead system poles [Razrabotka sposoba montazha podderzivayushih konstruykii na opore kontaktnoi seti]. *Naychnoe obozrenie – The scientific review*, 2014, no. 10 (part 1), pp. 60 – 62.

7. Kovalev A. A., Mikava A. V., Nesmelov F. S., Kardapolov A. A. The complex introduction of innovations on Russian railway transport [Kompleksnoe vnedrenie innovatsii na zheleznodorozhnom transporte Rossii]. *Transportnoe delo Rossii – The transport business of Russia*, 2013, no.4 (107), pp. 24 – 26.

8. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. The monitoring of infrastructure complex of current collection system during operation [Monitoring infrastruktturnogo kompleksa sistemy tokosy-oma v processe ekspluatacii]. *Innovacionnyi transport – The innovative transport*, 2012, no. 1(2), pp. 44 – 48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галкин Александр Геннадьевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: agalkin@usurt.ru

Ковалев Алексей Анатольевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: aakovalev@usurt.ru

Микава Александр Ваноевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: avmikava@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галкин, А. Г. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок [Текст] / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 69 – 75.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galkin Alexander Gennadievich

Ural State Transport University (USTU).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, The Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the department «The supply of transport», USTU.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: agalkin@usurt.ru

Kovalev Alexey Anatolievich

Ural State Transport University (USTU).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, The Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Head of the department «The supply of transport», USTU.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: agalkin@usurt.ru

Mikava Alexander Vanoevich

Ural State Transport University (USTU).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, The Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «The supply of transport», USTU.

Тел.: +7(343) 221-24-78.

E-mail: avmikava@usurt.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. The influence of inclination angle of a pole on static parameters for speed and highspeed catenary. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 69 – 75 (In Russian).

В. А. Кандаев, Ю. М. Елизарова, К. В. Авдеева, Н. К. Якунчихина

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМЕ ТРЕХ ПРОВОДНИКОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ

Аннотация. В статье приведена схема замещения трех проводников с учетом их взаимного влияния. Схема замещения содержит сопротивление и индуктивность каждого проводника, проводимость и емкость их изоляции по отношению к земле, а также взаимные индуктивности, проводимости и емкости изоляции между проводниками. Рассмотрены математические основы расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния. В качестве основы процесса автоматизации данного расчета с учетом существующих подходов к разработке программного обеспечения (ПО) выбрана итеративная инкрементальная модель жизненного цикла ПО. Указаны особенности, характерные для специализированного ПО: реализация расчетов на основе сложного математического аппарата в большинстве случаев, высокое быстродействие, возможность свободно оперировать большими объемами данных, высокая точность, возможность расширения функциональности, высокие требования пользователей к визуализации результатов. Предложена структурная схема программного комплекса, включающая в себя интерфейсный, расчетный модули и базу данных. Разработана блок-схема алгоритма работы расчетного модуля. Алгоритм основан на итеративном вычислении токов и напряжений для трех проводников с учетом их взаимного влияния в зависимости от координаты по длине проводника. В соответствии с выбранной моделью жизненного цикла программного обеспечения разработаны три версии ПО разной функциональности. Это позволило эффективно организовать процессы тестирования, отладки и внедрения. В итоге программный комплекс имеет оконный интерфейс, содержащий четыре вкладки и позволяющий вводить исходные данные для расчета, выводить результаты в виде графиков и таблицы. С целью обеспечения возможности сохранения результатов расчетов реализована связь с базой данных.

Ключевые слова: распределение электрических величин, взаимное влияние проводников, специализированное программное обеспечение, модель жизненного цикла программного обеспечения, итеративная инкрементальная разработка.

Vasilii A. Kandaev, Yulia M. Elizarova, Ksenia V. Avdeeva, Nadezhda K. Yakunchikhina

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

AUTOMATION OF THE CALCULATION OF THE DISTRIBUTION OF ELECTRICAL QUANTITIES IN THE SYSTEM OF THREE CONDUCTORS WITH ACCOUNT THEIR MUTUAL INFLUENCE

Abstract. The article presents the equivalent circuit of three conductors, taking into account their mutual influence. The equivalent circuit contains the resistance and inductance of each conductor, the conductivity and the capacitance of their insulation relative to the earth, as well as the mutual inductances, conductivities and capacitances of the insulation between the conductors. The mathematical foundations of calculating the distribution of electrical quantities in the system of three conductors are considered, taking into account their mutual influence. An iterative incremental model of the software life cycle was chosen as the basis for automating this calculation, taking into account existing approaches to software development. Specific features of specialized software are specified. A structural scheme of the software complex and a block diagram of the calculation algorithm are proposed. The algorithm is based on the iterative calculation of currents and voltages for three conductors, taking into account their mutual influence. In accordance with the chosen model of the life cycle of the software, three versions of software with different functionality have been developed. This allowed us to effectively organize the processes of testing, debugging and implementation. As a result, the software complex has a window interface containing four tabs and allowing to enter the initial data for the calculation, display the results in the form of graphs and tables. For saving the results of calculations, a connection with the database has been implemented.

Keywords: *distribution of electrical quantities, mutual influence of conductors, specialized software, software life cycle model, iterative incremental development.*

«Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [1] выделяет повышение уровня безопасности функционирования железных дорог как важнейший государственный приоритет развития и модернизации отрасли, научных исследований и текущей эксплуатационной работы. Безопасность железнодорожного транспорта зависит от надежности работы систем электроснабжения, телемеханики и связи, важнейшими элементами которых являются линии различных конструкций, функционирующие в условиях взаимных влияний, а также от влияния со стороны электротяги и линий электропередачи.

В зависимости от конструкции любую такую линию можно представить как однопроводную или как сочетание n однопроводных линий. Наличие электромагнитных связей между отдельными проводниками обуславливает переход энергии между ними. Распределение электрических величин в каждой однопроводной линии изменяется в зависимости от наличия соседних линий.

Решение системы уравнений для токов и напряжений для двух однопроводных линий с учетом их взаимного влияния представлено в работах [2, 3], для трех однопроводных линий – в работе [4].

В статье решается задача автоматизации расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния. Рассмотрим распространенный случай, где в качестве проводников выступают параллельно расположенные однородные однопроводные изолированные линии равной длины. Каждая линия характеризуется первичными параметрами на единицу длины: R_i , L_i – сопротивление и индуктивность i -й линии, G_i , C_i – проводимость и емкость изоляции i -й линии по отношению к земле. Кроме собственных между линиями на единицу длины имеются M_{ij} , G_{ij} , C_{ij} – взаимные индуктивность, проводимость изоляции и емкость между i -й и j -й линиями [5].

Схема замещения трех однопроводных линий приведена на рисунке 1.

В работе [4] для известных значений первичных и взаимных параметров линий получены используемые в процессе автоматизации формулы для определения напряжений и токов в системе трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния. Расчет с использованием этих формул сопряжен со значительными трудностями и может быть выполнен с помощью различного математического программного обеспечения. Недостатки данного подхода: отсутствие необходимой наглядности ввода исходных данных и представления результатов, определенный уровень подготовленности пользователя, отсутствие возможности сохранения результатов расчета в базе данных. Кроме того, большинство таких программных продуктов являются платными. Следовательно, задача автоматизации расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния является актуальной. Предлагается решение данной задачи посредством разработки специализированного программного обеспечения (ПО).

Разработка любого программного обеспечения состоит, как правило, из нескольких этапов [6]: постановка задачи, анализ требований и определение спецификаций, проектирование, реализация (кодирование, тестирование, отладка), сопровождение.

Разработка ПО основывается на методологиях, технологиях и инструментальных средствах. Методология реализуется через конкретные технологии и поддерживающие их стандарты, методики и инструментальные средства, которые обеспечивают выполнение процессов жизненного цикла (ЖЦ) ПО, который начинается с момента принятия решения о необходимости создания ПО и заканчивается в момент его полного изъятия из эксплуатации. Существует три основных модели ЖЦ ПО [6 – 9]: каскадная модель, поэтапная модель с про-

межуточным контролем, итеративная инкрементальная (IID) модель (эволюционная), частным случаем которой является спиральная модель.

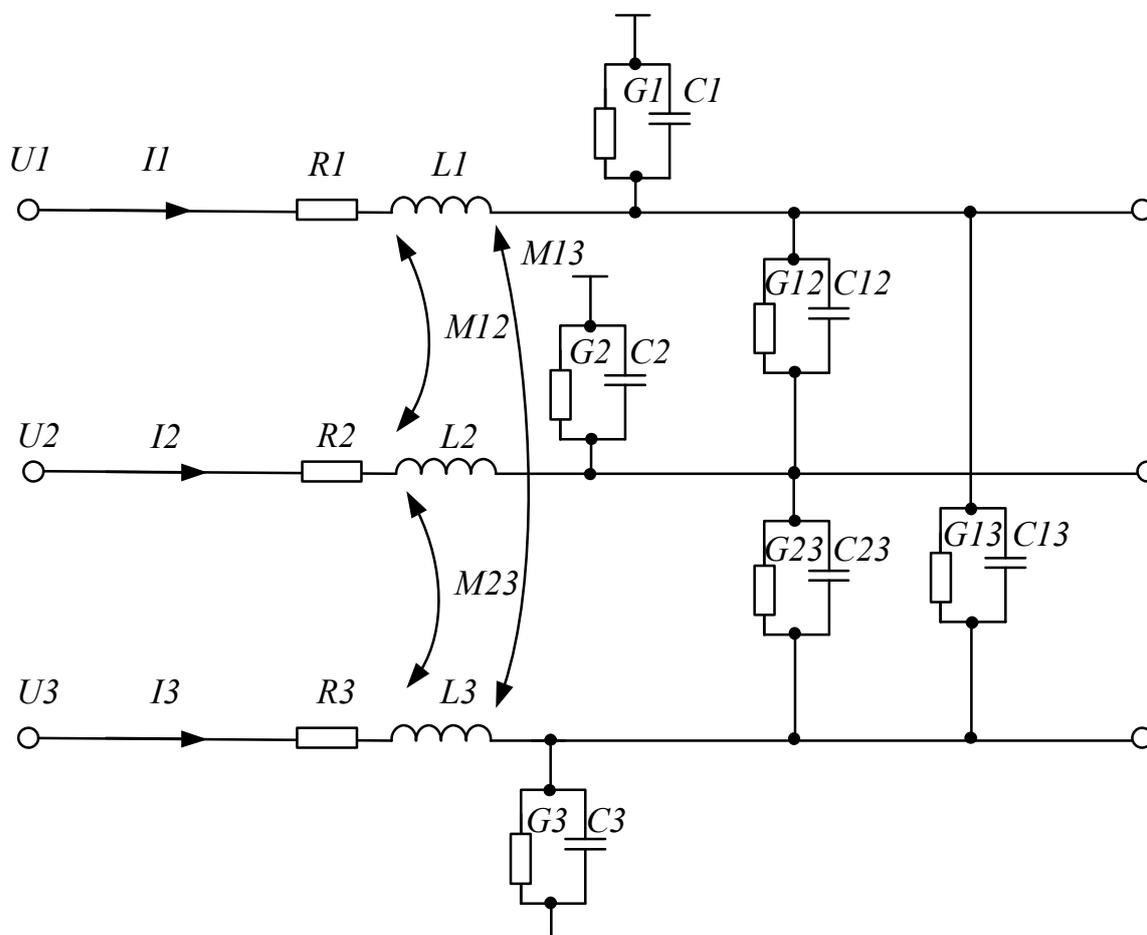


Рисунок 1 – Схема замещения трех однопроводных линий

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 [10], разработанный на основе международного стандарта, не предлагает конкретную модель ЖЦ и методы разработки ПО, он содержит описание структуры процессов ЖЦ ПО, но не содержит указаний, как реализовать или выполнить действия и задачи, включенные в эти процессы. Выбор модели ЖЦ ПО зависит от специфики и условий, в которых оно создается и функционирует.

Суть итеративной инкрементальной модели разработки состоит в том, что при принятии решения о создании ПО определяется его целевая функциональность, к которой стремятся в итоговой версии ПО. Процесс создания ПО делится на несколько итераций, каждая из которых содержит типовые этапы разработки. По окончании каждой итерации имеется работоспособная версия программы (релиз), обладающая реализованной функциональностью, с каждой итерацией приближающейся к целевой. Переходить к следующей итерации можно, не дожидаясь полного завершения работы в рамках текущей итерации [9].

Специализированное ПО, к которому относится данная программа, имеет ряд особенностей. Во-первых, к такому ПО часто предъявляются следующие требования: реализация расчетов на основе сложного математического аппарата, высокое быстродействие, возможность свободно оперировать большими объемами данных, высокая точность. Во-вторых, в условиях развитости информационных технологий необходимая функциональность расширяется,

возрастают требования пользователя к визуализации результатов. С учетом этих особенностей при создании такого ПО особую важность приобретают обоснованность выбора общей концепции разработки и процесс тестирования и отладки.

Изложенное выше определило выбор для ПО расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния итеративной инкрементальной модели ЖЦ. Важно, что в данном случае одновременно с тестированием более ранней версии может осуществляться разработка новой. Каждая версия представляет собой работоспособный продукт, предоставляемый пользователям, что активизирует процесс уточнения и дополнения требований. Следовательно, есть возможность исправить выявленные в ходе предыдущей итерации недостатки.

Кроме того, одним из преимуществ этой модели ЖЦ ПО является переработка целей на каждой итерации (динамическое формирование требований). Следует отметить, что с каждой итерацией убывает неопределенность относительно итогового исполнения ПО. В случае разработки специализированного ПО могут меняться приоритеты требований, особенности математического аппарата, может требоваться большая вычислительная мощность.

Описываемое в данной работе ПО должно удовлетворять ряду требований: реализация заданного алгоритма, предоставление интерфейса прямого манипулирования, возможность вывода графиков, наглядность вывода расчетных данных, возможность сохранения результатов в базе данных, контроль вводимой информации, блокировка некорректных действий пользователя при работе с системой. Конечной целью (целевой функцией), определяемой в соответствии с итеративной инкрементальной моделью ЖЦ ПО, является удовлетворение всех заявленных, уточненных и дополненных требований.

На основе результатов анализа требований принято решение реализовать программный комплекс, состоящий из трех элементов (рисунок 2): интерфейсный модуль, расчетный модуль и база данных (БД).

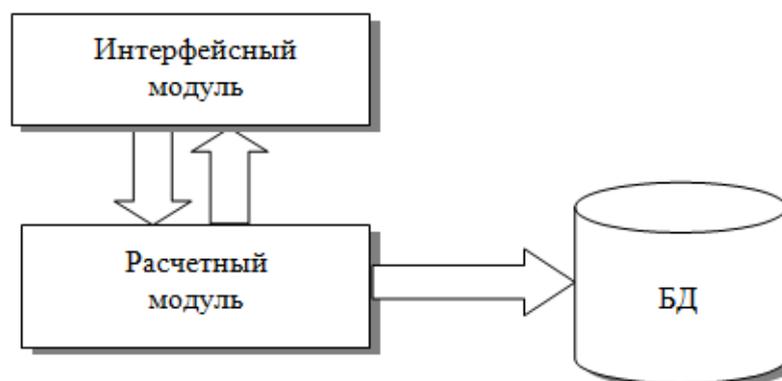


Рисунок 2 – Структурная схема программного комплекса

Интерфейсный модуль обеспечивает ввод исходных данных и вывод результирующих, о чем свидетельствует двусторонняя связь между соответствующими блоками на рисунке 2. Из рисунка 2 видно также, что программный комплекс обеспечивает возможность сохранения полученных результатов в базе данных.

Расчетный модуль реализовывает основанный на приведенных в статье [4] формулах алгоритм расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния. Блок-схема этого алгоритма представлена на рисунке 3.

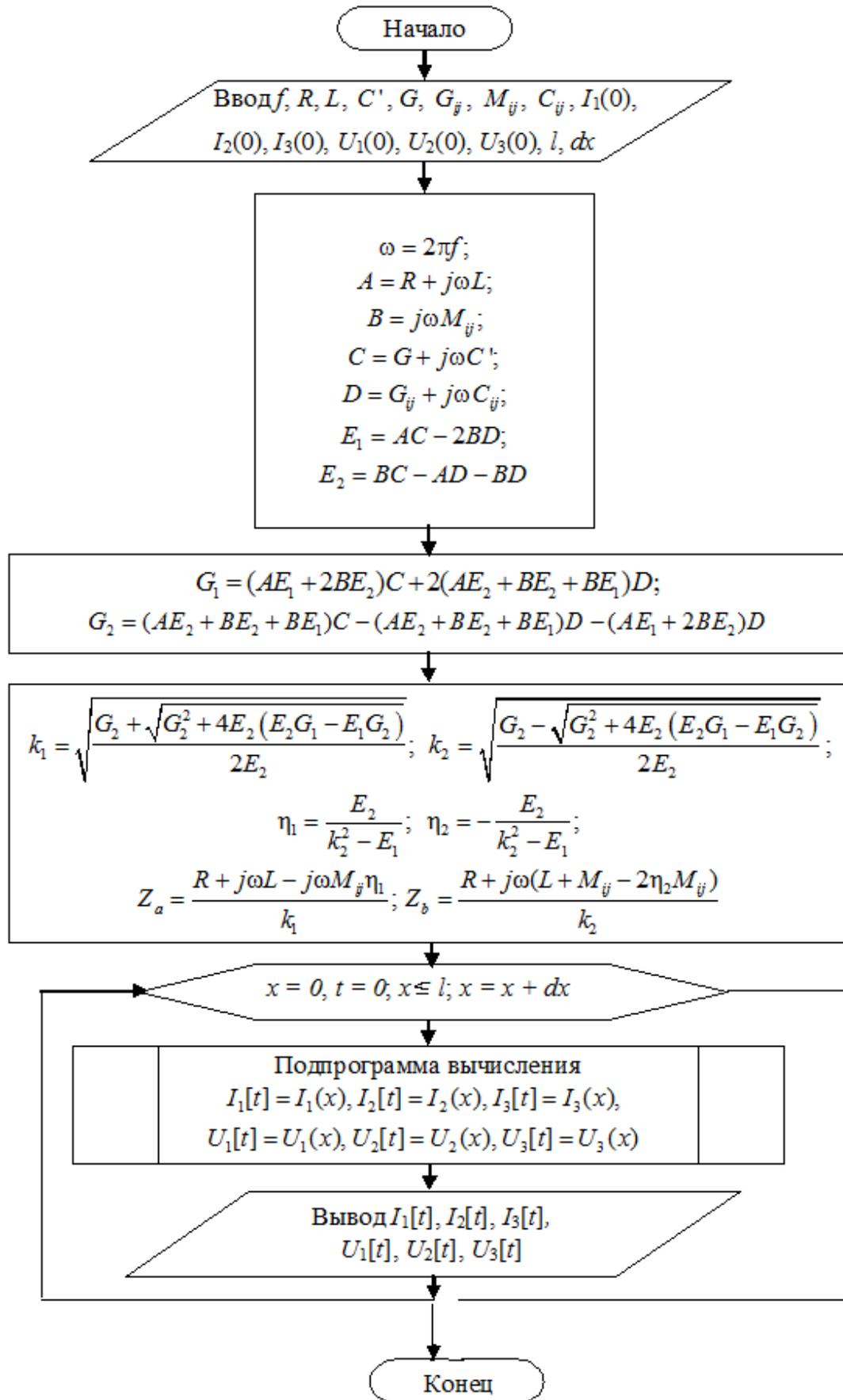


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы расчетного модуля

В блок-схеме алгоритма работы расчетного модуля (см. рисунок 3) происходит вызов под-программы, реализующей вычисления токов и напряжений в системе трех одинаковых одно-проводных линий с учетом их взаимного влияния по формулам, приведенным в статье [4]:

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

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

$$\begin{aligned}
 I_3(x) = & \frac{1}{Z_a} \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) + Z_a I_3(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{1}{Z_a} \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) - Z_a I_3(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} - \\
 & - \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) + Z_b(I_1(0) + I_2(0)) + Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{\eta_2}{Z_b} \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) - Z_b(I_1(0) + I_2(0)) - Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 U_1(x) = & \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) + Z_a I_1(0) + Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_1(0) - \eta_1(U_2(0) + U_3(0)) - Z_a I_1(0) - Z_a \eta_2(I_2(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) + Z_b(I_2(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_2(0) + U_3(0) - \eta_2 U_1(0) - Z_b(I_2(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_1(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 U_2(x) = & \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) + Z_a I_2(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_2(0) - \eta_1(U_1(0) + U_3(0)) - Z_a I_2(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_3(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) + Z_b(I_1(0) + I_3(0)) + Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_3(0) - \eta_2 U_2(0) - Z_b(I_1(0) + I_3(0)) - Z_b \eta_1 I_2(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)};
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 U_3(x) = & \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) + Z_a I_3(0) + Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{-k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \frac{(U_3(0) - \eta_1(U_1(0) + U_2(0)) - Z_a I_3(0) - Z_a \eta_2(I_1(0) + I_2(0))) \cdot e^{k_1 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) + Z_b(I_1(0) + I_2(0)) + Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{-k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)} + \\
 & + \eta_1 \frac{(U_1(0) + U_2(0) - \eta_2 U_3(0) - Z_b(I_1(0) + I_2(0)) - Z_b \eta_1 I_3(0)) \cdot e^{k_2 x}}{2(1 - \eta_1 \eta_2)}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Входными данными для алгоритма расчета помимо первичных и взаимных параметров линий являются частота сигнала f , длина линии l , шаг расчета dx , значения токов и напряжений в начале каждой из трех линий: $I_1(0)$, $I_2(0)$, $I_3(0)$, $U_1(0)$, $U_2(0)$, $U_3(0)$ соответственно.

На основе приведенных схем реализован программный комплекс. В качестве языкового средства для разработки выбран язык программирования C++, одним из основных преимуществ которого является высокое быстродействие, что позволяет обеспечить выполнение основных требований к данному ПО.

В соответствии с итеративной инкрементальной моделью ЖЦ ПО разработаны три версии разной функциональности. В первой версии реализован прототип ПО в виде консольного приложения, реализующего заданный алгоритм расчета, на основе контрольных тестов отлажена точность расчетов.

Во второй версии ПО разработан программный модуль, предоставляющий графический интерфейс прямого манипулирования. Реализована и отлажена связь расчетного и интерфейсного модулей.

В третьей версии программы на основе данных, полученных в процессе тестирования предыдущей версии, произведены структурные изменения интерфейса, добавлен вывод графиков зависимостей тока и потенциалов от длины линии, создана база данных, организовано сохранение в нее полученных данных. Окна работы программы представлены на рисунках 4, 5.

Для работы с программой в левой части вкладки «Входные параметры» (см. рисунок 4) необходимо ввести исходные данные, далее нажать на кнопку «Расчет», после чего во вкладках «График 1», «График 2» будут построены графики зависимостей токов и напряжений по длине проводников, числовые значения этих величин выводятся в таблицу в соответствующей вкладке (см. рисунок 5).

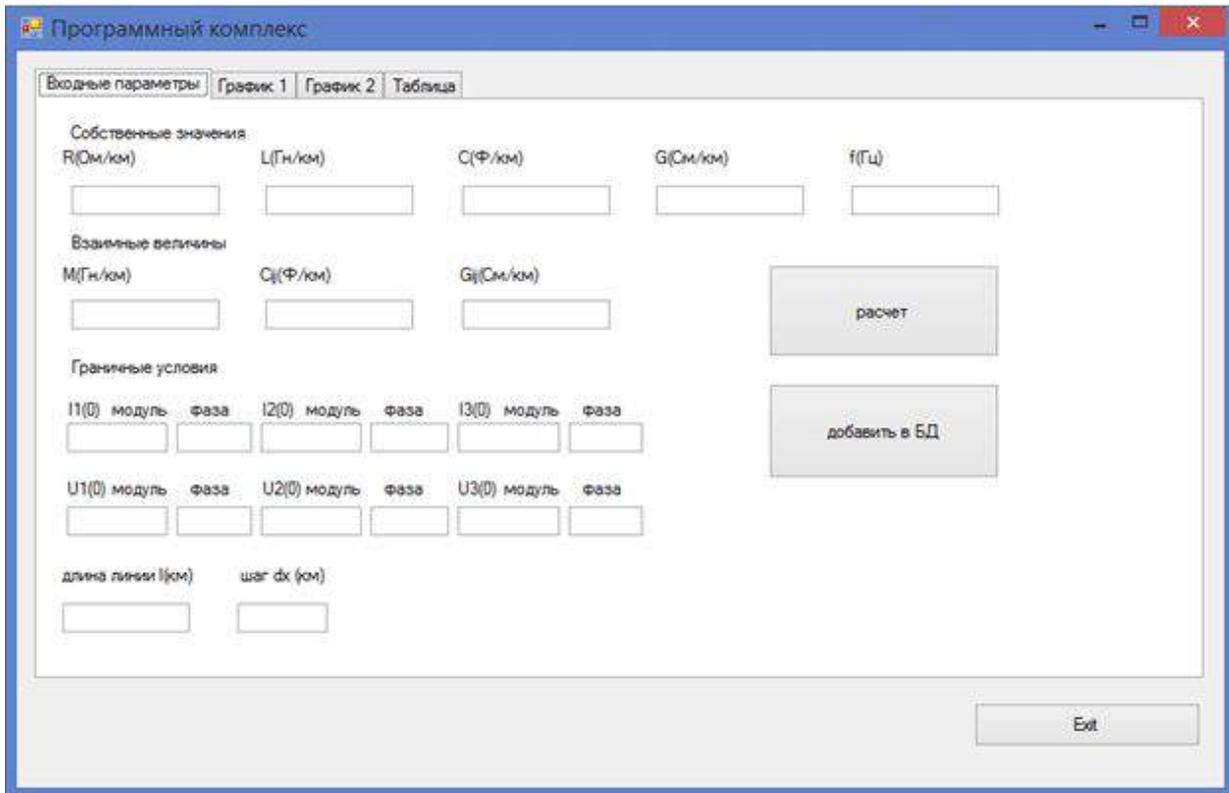


Рисунок 4 – Вкладка «Входные параметры» программного комплекса

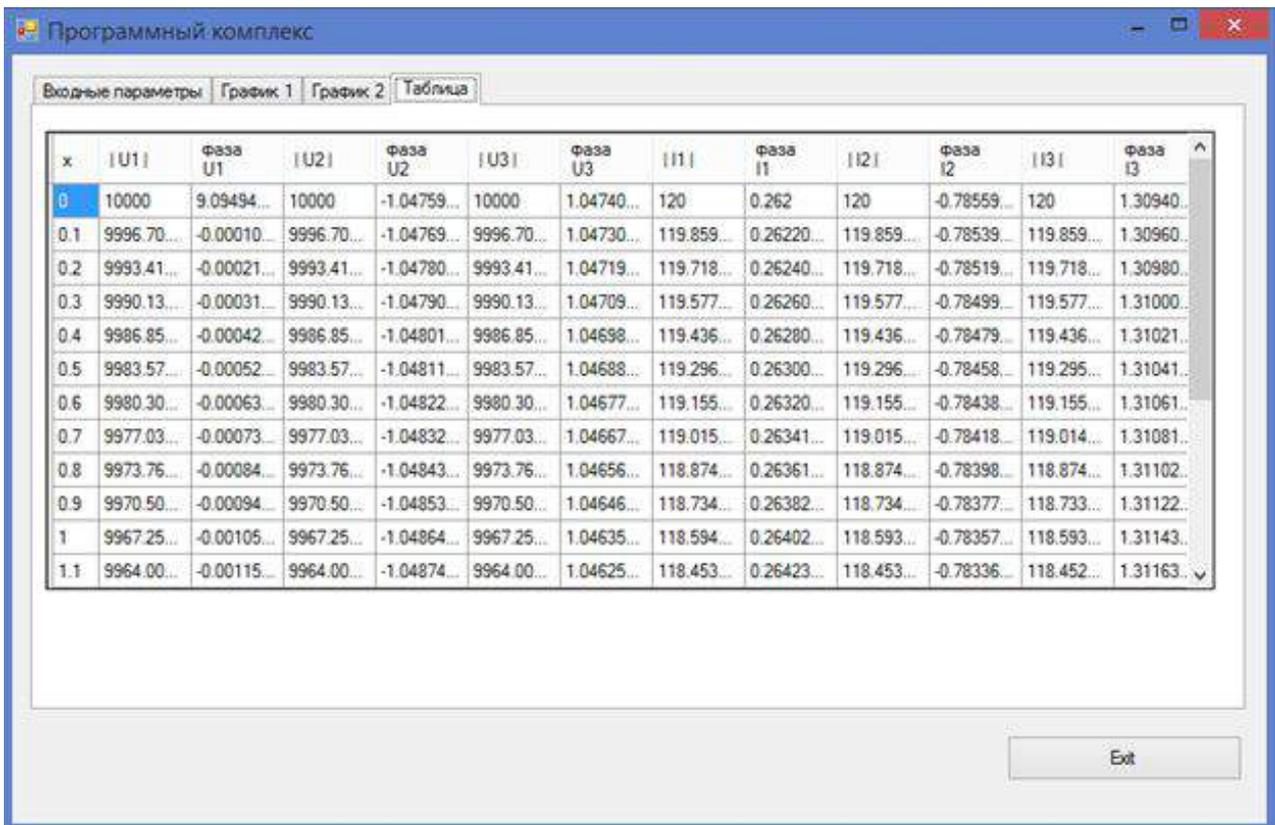


Рисунок 5 – Вкладка «Таблица», содержащая числовые результаты расчетов электрических величин

База данных содержит связанные таблицы входных данных и результатов расчета, запись в которые осуществляется по нажатию на кнопку «Добавить в БД» во вкладке «Входные параметры».

На практике данная версия программного комплекса может использоваться для проведения оценки режимов работы трехпроводных линий электроснабжения, имеющих одинаковые первичные параметры и расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, с учетом их взаимного влияния.

В качестве граничных условий можно использовать любые значения токов и напряжений.

Сохранение результатов в базе данных позволяет сократить временные затраты пользователя при работе с ПО и предоставляет возможность постобработки полученных значений для сравнения различных режимов работы.

Таким образом, в работе получены следующие результаты.

1. Предложено принять за основу итеративную инкрементальную модель ЖЦ ПО в процессе автоматизации расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния.

2. Разработаны структурная схема программного комплекса и блок-схема алгоритма расчета.

3. Реализован программный комплекс, позволяющий не только рассчитать требуемые значения, но и хранить их во внешней БД. Это сокращает временные затраты пользователя при работе с ПО, предоставляет возможность постобработки полученных значений.

4. Данная версия программного комплекса может использоваться для расчета распределения электрических величин трехпроводных линий электроснабжения, имеющих одинаковые первичные параметры и расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, с учетом их взаимного влияния.

5. В соответствии с выбранной моделью ЖЦ предполагается дальнейшее расширение функциональности предложенного в статье программного комплекса, в том числе добавление возможностей выбора количества проводников и задание первичных параметров отдельно для каждого проводника. Это позволит применять ПО для симметричных и несимметричных многопроводных линий электроснабжения и связи.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта России до 2030 года [Электронный ресурс]. http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997#5455

2. Коваленков, В. И. Взаимное влияние линий [Текст] // Научно-технический сборник. Л.-М.: Гос. изд-во по технике связи, 1935. – Вып.10. – С. 48 – 54.

3. Ерита, А. М. Распределение токов и потенциалов в системе двух изолированных проводников с учетом их взаимного влияния [Текст] / А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосиб. гос. акад. вод. трансп. – Новосибирск. – 2010. – № 1. – С. 339 – 345.

4. Авдеева, К. В. Распределение тока и напряжения в системе трех однопроводных линий с учетом их взаимного влияния [Текст] / К. В. Авдеева, А. А. Медведева, Н. К. Слептерева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 1(17). – С. 30 – 42.

5. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений системы электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.

6. Иванова, Г. С. Технология программирования [Текст] / Г. С. Иванова. – М.: КноРус, 2016. – 334 с.
7. Грекул, В. И. Проектирование информационных систем [Текст] / В. И. Грекул, Г. Н. Денищенко, Н. Л. Коровкина. – М.: Интуит, 2008. – 304 с.
8. Зараменских, Е. П. Управление жизненным циклом информационных систем [Текст] / Е. П. Зараменских / Центр развития научного сотрудничества. – Новосибирск, 2014. – 270 с.
9. Larman C., Basili V. Iterative and Incremental Development: A Brief History, *Computer*, 2003, vol. 36 (6), pp. 47 – 56.
10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология (ИТ). Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2011. – 100 с.

References

1. Strategija razvitija zheleznodorozhnogo transporta Rossii do 2030 goda (Strategy for the development of railway transport in Russia until 2030). http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997#5455
2. Kovalenkov V.I. Mutual influence of lines [Vzaimnoe vlijanie linij]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik* (Scientific and technical collection). Moscow, 1935, no.10, pp. 48 – 54.
3. Erita A. M., Kandaev V. A., Avdeeva K. V. The distribution of currents and potentials in the system of two insulated conductors, taking into account their mutual influence [Raspredelenie tokov i potencialov v sisteme dvuh izolirovannyh provodnikov s uchetom ih vzaimnogo vlijanija]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2010, no. 1, pp. 339 – 345.
4. Avdeeva K.V., Medvedeva A. A., Slepereva N. K. Distribution of current and voltage in the three single-wire lines taking into account their mutual influence [Raspredelenie toka i naprjazhenija v sisteme treh odnoprovodnyh linij s uchetom ih vzaimnogo vlijanija]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1(17), pp. 30 – 42.
5. Kotelnikov A.V., Kandaev V. A. Bluzhdajushhie toki i jekspluatacionnyj kontrol' korrozionnogo sostojanija podzemnyh sooruzhenij sistemy jelektrosnabzhenija zheleznodorozhnogo transporta (Wandering currents and operational control of the corrosive state of the underground structures of the power supply system of railway transport). Moscow: UMT ZDT, 2013, 552 p.
6. Ivanova G. S. Tehnologija programmirovanija (Programming technology). Moscow: Knorus, 2016, 334 p.
7. Grekul V. I., Denischenko G. N., Korovkina N. L. Proektirovanie informacionnyh sistem (Information Systems Design). Moscow: Intuit, 2008, 304 p.
8. Zaramenskikh E. P. Upravlenie zhiznennym ciklom informacionnyh sistem (Information Systems Lifecycle Management). Novosibirsk: ZRNS Publ., 2014, 270 p.
9. Larman C., Basili V. Iterative and Incremental Development: A Brief History, *Computer*, 2003, vol. 36 (6), pp. 47 – 56.
10. Informacionnaja tehnologija (IT). Sistemnaja i programmaja inzhenerija. Processy zhiznennogo cikla programmnyh sredstv, GOST R ISO/MEK 12207-2010 (Information Technology (IT). System and software engineering. Software life cycle processes, State Standart 12207-2010). Moscow, Standarty, 2011, 100 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

Елизарова Юлия Михайловна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-66.

E-mail: yuel@yandex.ru

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

Якунчихина Надежда Константиновна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кандаев, В. А. Автоматизация расчета распределения электрических величин в системе трех проводников с учетом их взаимного влияния [Текст] / В. А. Кандаев, Ю. М. Елизарова, К. В. Авдеева, Н. К. Якунчихина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 76 – 86.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

Elizarova Yulia Michailovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Information Security», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-66.

E-mail: yuel@yandex.ru

Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

Yakunchikhina Nadezhda Konstantinovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kandaev V. A., Elizarova Y. M., Avdeeva K. V., Yakunchikhina N. K. Automation of the calculation of the distribution of electrical quantities in the system of three conductors with account their mutual influence. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 76 – 86 (In Russian).

Ю. В. Кондратьев¹, В. А. Кващук², Е. К. Хусаинов¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению, г. Омск, Российская Федерация

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ РЕЖИМАХ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос обеспечения защиты контактной сети при выводе в ремонт оборудования распределительных устройств напряжением 3,3 кВ тяговых подстанций постоянного тока Называевского направления Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги. При выводе в ремонт оборудования распределительных устройств напряжением 3,3 кВ происходит увеличение зоны защиты для присоединений контактной сети смежных объектов системы тягового электроснабжения (тяговые подстанции, посты секционирования, пункты параллельного соединения). Для обеспечения защиты контактной сети постоянного тока вводятся в работу пониженные уставки срабатывания быстродействующих автоматических выключателей, которые неизбежно ограничивают пропускную способность участка для пропуска грузовых поездов. Рассмотрен существующий порядок вывода оборудования в ремонт с включением у тяговой подстанции поста секционирования. Оценены ограничения пропускания грузовых поездов при реализации существующей схемы. Просчитаны токи короткого замыкания и выбраны уставки защит быстродействующих выключателей при отключении поста секционирования и включении секционных разъединителей станции. Выявлено невыполнение условия выбора уставок защит при отстройке от минимального значения тока короткого замыкания. Для снижения ограничений разработан опытный образец короткозамыкателя контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ. Применение короткозамыкателя позволило осуществлять защиту контактной сети на время вывода в ремонт оборудования распределительного устройства без перевода на пониженные уставки срабатывания автоматических выключателей. Приведены технические характеристики и особенности предлагаемой конструкции устройства. Представлены результаты проведенного испытания короткозамыкателя контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ на участке Драгунская – Новокиевская – Любинская. Определены основные направления для дальнейших работ авторов.

Ключевые слова: контактная сеть, защита, короткозамыкатель, пропускная способность, модуль контроля напряжения.

Yuri V. Kondratiev, Valentin A. Kvaschuk, Yermek K. Khusainov

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²West Siberian Directorate for Energy Supply, Omsk, the Russian Federation,

³Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THE PROTECTION OF THE CONTACT NETWORK OF A DIRECT CURRENT AT FORCED MODES

Abstract. The article considers the issue of providing protection for the contact network when removing 3.3 kV traction substations from the Nazivoye direction of the Omsk power supply distance of the West Siberian Railway. When the 3.3 kV switchgear is brought out to repair, the protection zone for connection of the contact network of adjacent traction power supply system objects (traction substations, sectionalizing stations, parallel connection points) increases. To ensure the protection of the DC contact network, lowered settings for the operation of high-speed circuit breakers are introduced, which inevitably limit the capacity of the section for the passage of freight trains. Considered the existing order of withdrawal of equipment for repair with the inclusion of a traction substation post section. The limitations of skipping freight trains during the implementation of the existing scheme are estimated. Short circuit currents are also calculated and the settings for the protection of high-speed circuit breakers are selected when the sectioning station is switched off and the sectional disconnectors of the station are switched on. It was found that the condition for selecting the protection settings is not fulfilled when detaching from the minimum value of the short-circuit current. To reduce the limitations, a prototype of a short-circuit contactor of a direct current 3.3 kV grid has been developed. The use of a short-circuit-breaker allowed the protection of the contact network, for the time of the withdrawal of the switchgear equipment for repair, without transferring to lower settings for the operation of circuit breakers. Also in the article are given the technical characteristics and features of the proposed device design. The results of a test of a short-circuit of a 3.3 kV direct current contact network in the Dragunskaya-Novokievskaya-Lubinskaya section are presented. The main directions for further work are determined.

Key words: contact network, protection, short-circuit, throughput, voltage control module.

Известно, что основным ограничивающим фактором в реализации максимальной пропускной способности поездов на отдельных участках является расстояние между тяговыми подстанциями (ТПС). Так, на участке Омск – Называевская Западно-Сибирской железной дороги протяженность межподстанционных зон составляет от 21 до 27,4 км. В вынужденных режимах на этом участке при узловых схемах питания тяговой сети и отключении подстанции протяженность зон, заключенных между постами секционирования (ПС), удваивается, соответственно увеличиваются токи тяговой нагрузки фидеров ПС, питающих эту зону при одновременном снижении минимальных токов короткого замыкания. В этих режимах токи нагрузки соизмеримы и даже превышают токи короткого замыкания, поэтому при выводе в ремонт распределительных устройств РУ-3,3 кВ тяговых подстанций на контактной сети неизбежно появление так называемых «мертвых зон», в которых не обеспечивается защита контактной сети от коротких замыканий.

Создание раздела питания у отключенной тяговой подстанции или переход на пониженные уставки токовых защит фидеров контактной сети приводят к избыточным отключениям быстродействующих выключателей (БВ) от токов нагрузки и, как следствие, к необходимости ограничения пропускной способности поездов. Кроме того, для перехода на пониженные уставки необходима установка дополнительных датчиков тока (РДШ, герконов) или цифровых терминалов защит ИнТер-3,3 кВ (ранее – ЦЗАФ-3,3 кВ). В соответствии с рекомендациями [1] терминал позволяет реализовать второй набор уставок.

Телеблокировка УТБ-3,3 кВ, предназначенная для выдачи команды аварийного отключения смежного фидерного выключателя фидерной зоны, принципы которой описаны в работах [2 – 4], не применяется из-за низкой надежности линий связи.

Для обеспечения пропускной способности и защиты контактной сети в 80-х гг. на территории ряда подстанций (Любинская, Новокиевская и др.) устанавливались посты секционирования, которые вводились в работу только на период отключения РУ-3,3 кВ подстанций. Очевидно, что такое решение сопряжено со значительными капитальными затратами и с необходимостью эксплуатации оборудования, которое находится в работе не более двух – трех суток в течение года (рисунок 1).

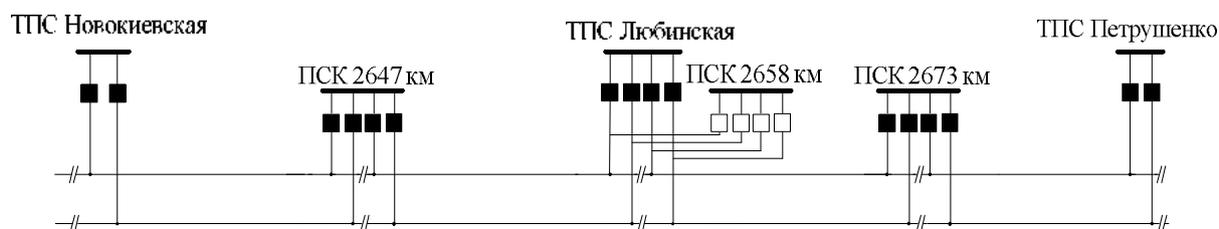


Рисунок 1 – Нормальная схема питания участка Новокиевская – Петрушенко

Дорожной электротехнической лабораторией Западно-Сибирской железной дороги (ДЭЛ ЗСЖД) выполнена оценка эффективности применения ПС под фидерами ТПС Любинская для снижения ограничений пропускной способности и обеспечения защиты контактной сети при выводе в ремонт РУ-3,3 кВ этой подстанции. Расчет пропускной способности выполнялся в программном комплексе «КОРТЭС» с учетом стандартов [5 – 7] для двух вариантов схем питания тяговой сети с включенным и отключенным ПСК 2 658 км по пакетному графику движения с заданными межпоездными интервалами [8, 9] по методике, описанной в источнике [10]:

в нечетном направлении – пакеты из четырех поездов, из них один поезд весом 8 000 т, один соединенный поезд весом 12 000 т, остальные – унифицированной весовой нормы 6 300 т;

в четном направлении – пакеты из четырех поездов, из них один поезд весом 7 000 т, остальные – унифицированной весовой нормы 5 000 т.

Для обеспечения уровня напряжения в контактной сети не ниже 2 700 В для обоих вариантов необходимо ограничить вес нечетных поездов, увеличить минимальные межпоездные интервалы попутного следования, ограничить максимальные ходовые позиции контроллеров локомотивов нечетных и четных поездов и поддерживать напряжение на шинах ТПС Новокиевский и Петрушенко не ниже 3 800 В. Результаты расчетов показали, что применение ПСК не снимает ограничения на пропуск грузовых поездов, а уровни напряжений в контактной сети изменяются незначительно.

Проведены также расчет токов короткого замыкания и выбор уставок защит для варианта при отсутствии ПСК 2658 км и включенных секционных разъединителей «А» и «Б» на станции Любинская при выводе в ремонт оборудования РУ-3,3 кВ. Допустимые уставки защит представлены в таблице 1. Пределы регулировки токов уставки взяты из источников [11, 12].

Таблица 1 – Токи и уставки защит фидеров контактной сети

Объект	Номер присоединения	Вид защиты	Существующая уставка, А	Макс. рабочий ток, А	Мин. ток к.з., А	Уставки защит для ремонтной схемы питания	Примечание
ПСК 2647 км	C1	МИЗ, А	2300	1224	2463	$1400 \leq I_y \leq 2400$	–
	C2	МИЗ, А	2300	1228	2542	$1400 \leq I_y \leq 2500$	–
	C3	МИЗ, А	2200	2184	1589	$2500 \leq I_y \leq 1500$	Условие не выполняется
	C4	МИЗ, А	2200	1122	1640	$1200 \leq I_y \leq 1600$	–
ПСК 2673 км	C1	МИЗ, А	3000	1795	1676	$2000 \leq I_y \leq 1600$	Условие не выполняется
	C2	МИЗ, А	3000	1182	1733	$1300 \leq I_y \leq 1700$	–
	C3	МИЗ, А	3000	1344	3626	$1500 \leq I_y \leq 3600$	–
	C4	МИЗ, А	3000	1036	3626	$1100 \leq I_y \leq 3600$	–

Принятый практический вариант вывода в ремонт РУ-3,3 ТПС Любинская предполагает применение ПСК 2658 км. Допустимые уставки защит представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Токи и уставки защит фидеров контактной сети

Объект	Номер присоединения	Вид защиты	Существующая уставка, А	Макс. рабочий ток, А	Мин. ток к.з., А	Уставки защит для ремонтной схемы питания I_y , А	Примечание
ПСК 2647 км	C1	МИЗ, А	2300	1035	2466	$1100 \leq I_y \leq 2400$	–
	C2	МИЗ, А	2300	1041	2549	$1100 \leq I_y \leq 2500$	–
	C3	МИЗ, А	2200	1322	2856	$1500 \leq I_y \leq 2800$	–
	C4	МИЗ, А	2200	1211	2856	$1200 \leq I_y \leq 2800$	–
ПСК 2658 км	C1	МИЗ, А	2100	2055	2172	$2300 \leq I_y \leq 2100$	Условие не выполняется
	C2	МИЗ, А	2100	820	2172	$900 \leq I_y \leq 2100$	–
	C3	МИЗ, А	1900	1436	1920	$1500 \leq I_y \leq 1900$	–
	C4	МИЗ, А	1900	734	1994	$800 \leq I_y \leq 1900$	–
ПСК 2673 км	C1	МИЗ, А	3000	1828	2487	$2100 \leq I_y \leq 2400$	–
	C2	МИЗ, А	3000	1498	2613	$1700 \leq I_y \leq 2600$	–
	C3	МИЗ, А	3000	1319	3639	$1500 \leq I_y \leq 3600$	–
	C4	МИЗ, А	3000	1139	3646	$1300 \leq I_y \leq 3600$	–

При существующей схеме вывода в ремонт РУ-3,3 кВ ТПС Любинская защита контактной сети от токов короткого замыкания не обеспечивается. Защита не отстроена от максимальных токов нагрузки, и поэтому при выборе уставки из условия отстройки от токов нагрузки неизбежно появление «мертвых» зон чувствительности защит.

Для решения этих задач ДЭЛ ЗСЖД был разработан и собран опытный образец короткозамыкателя контактной сети КЗКС-3,3 кВ. Принцип действия короткозамыкателя заключается в следующем: при коротком замыкании в защищаемой зоне контактной сети срабатывает реле напряжения, реагирующее на снижение напряжения ниже уставки. Далее реле напряжения собирает цепь на включение короткозамыкателя. Короткозамыкатель перемещает место короткого замыкания в зону, которая надежно защищается выключателем, ликвидируя таким образом «мертвые» зоны.

Схема предлагаемого ремонтного режима с устройством представлена на рисунке 2.

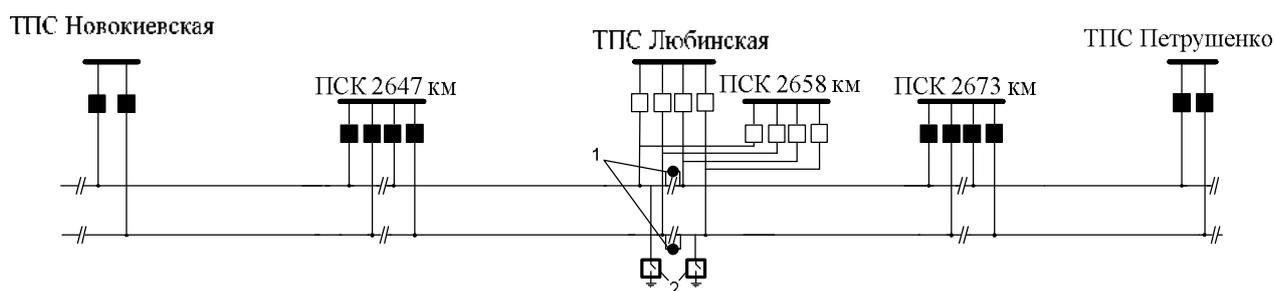


Рисунок 2 – Ремонтная схема с короткозамыкателем:

1 – включенные секционные выключатели А и Б на ст. Любинская; 2 – короткозамыкатели КЗКС-3,3 кВ

Уставки защит при использовании короткозамыкателя КЗКС-3,3 кВ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные токи и уставки фидеров контактной сети

Объект	Присоединение	Вид защиты	Макс. рабочий ток, А	Мин. ток к.з., А	Уставки защит для ремонтной схемы питания
ПСК 2647 км	С1	МИЗ, А	1224	2463	$1400 \leq I_y \leq 2400$
	С2	МИЗ, А	1228	2542	$1400 \leq I_y \leq 2500$
	С3	МИЗ, А	2184	3278	$2500 \leq I_y \leq 3200$
	С4	МИЗ, А	1122	3278	$1200 \leq I_y \leq 3200$
ПСК 2673 км	С1	МИЗ, А	1795	2504	$2000 \leq I_y \leq 2500$
	С2	МИЗ, А	1182	2629	$1300 \leq I_y \leq 2600$
	С3	МИЗ, А	1344	3626	$1500 \leq I_y \leq 3600$
	С4	МИЗ, А	1036	3626	$1100 \leq I_y \leq 3600$

В результате допустимый диапазон уставок защит отстроен как от максимальных токов нагрузки, так и от минимальных токов короткого замыкания.

Таким образом, авторы статьи считают, что применение ПСК при выводе в ремонт оборудования РУ-3,3 кВ ТПС сопряжено с повышенными эксплуатационными расходами на техническое обслуживание и повышенными рисками повреждений контактной сети из-за наличия «мертвых зон». Применение короткозамыкателей позволит исключить перечисленные выше недостатки применения ПСК. Пост секционирования 2568 км рекомендуется демонтировать, а высвободившееся оборудование ПСК использовать в случае необходимости для решения других задач.

Короткозамыкатель, конструктивное исполнение которого представлено на рисунке 3, а, а схема управления – на рисунке 4, состоит из коммутационной части (1) на базе однофазного вакуумного выключателя ВВ/TEL-24-12,5/1000-У2, модуля контроля напряжения (2), блока питания и блока управления выключателем, которые находятся в отдель-

ном отсеке – шкафу управления (3). Источниками оперативного питания короткозамыкателя могут служить аккумуляторная батарея напряжением 12 В или сеть переменного (постоянного) тока напряжением 220 В. Основными преимуществами короткозамыкателя являются его высокая термическая стойкость (предельный ток короткого замыкания – 12,5 кА при времени его протекания не более 3,0 с), большой коммутационный ресурс и отсутствие электрической дуги при срабатывании. Гальваническая развязка цепей измерения и управления выполнена посредством оптоволоконного кабеля. В схеме управления предусмотрены цепи контроля срабатываний короткозамыкателя. Относительно небольшой вес – 42 кг – позволит применять короткозамыкатель в качестве мобильного средства защиты контактной сети на тех участках, где возникает в этом необходимость. Разработка осуществлялась с выполнением требований Правил ... [13, 14].

Интеллектуальное управление вакуумным выключателем осуществляется модулем контроля напряжения типа МКН-1 (МКН), представляющим собой специализированное микропроцессорное устройство. МКН формирует команду «ВКЛ» на включение коммутатора ВВ/TEL при условии, если напряжение в контактной сети понизится и будет находиться в пределах диапазона, заданного уставками $U_{\min} \leq U_{\text{КС}} \leq U_{\max}$, в течение не менее 120 мс.

Если после включения в течение времени более 500 мс напряжение в контактной сети (КС) отвечает условию $U_{\text{КС}} \leq U_{\min}$, микроконтроллер формирует управляющий сигнал «ОТКЛ». Этого времени достаточно для отключения БВ от действия токовых защит.

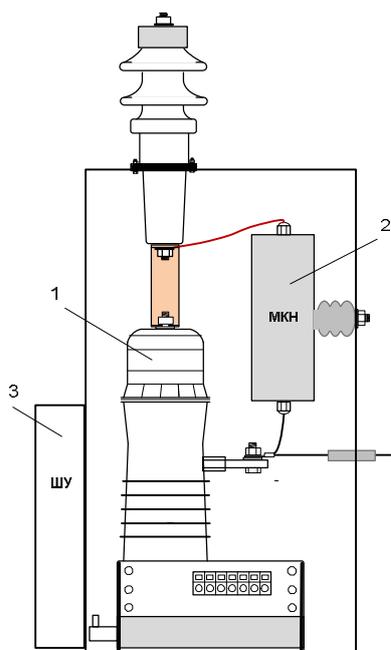


Рисунок 3 – Конструкция короткозамыкателя

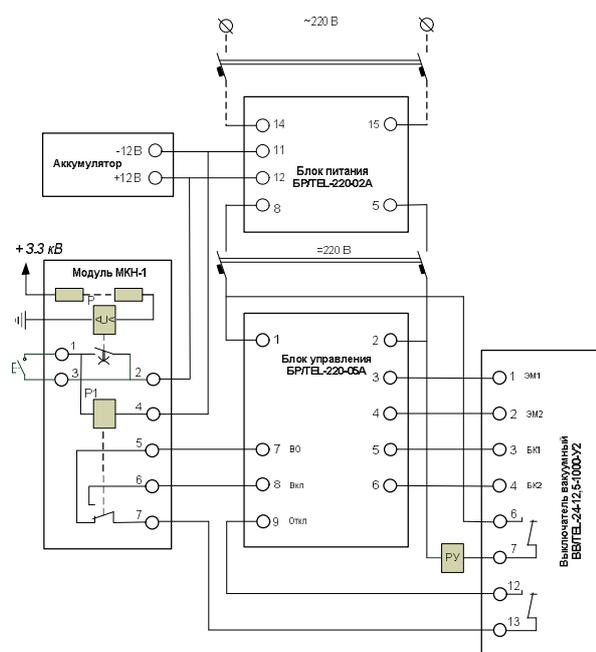


Рисунок 4 – Схема управления короткозамыкателем

Испытания короткозамыкателя проведены в апреле 2015 г. на участке ПСК 2623 км – ТПС Новокиевская – ПСК 2647 км Омской дистанции электроснабжения. Место установки короткозамыкателя – ТПС Новокиевская. Для регистрации напряжения в контактной сети и тока в процессе короткого замыкания на фидер № 2 ТПС Новокиевская установлен блок цифровой защиты и автоматики ЦЗАФ-3,3 с действием на «сигнал». Уставка максимальной токовой защиты блока принята $I_{\text{МТЗ}} = 1500$ А. Короткозамыкатель установлен на опору отсасывающего фидера. В качестве разъединителя короткозамыкателя временно использовался заземляющий нож «отсоса» – ЗРО. Испытания проводились в «окно» по обоим путям от ТПС Драгунская до ПСК 2647 км. Для проведения испытаний подготовлена схема таким образом, что при коротком замыкании в «мертвой» зоне у ПСК 2647 км ток протекал от ТПС Драгунская к точке КЗ только по тяговой сети второго пути через шины подстанции Новокиевская.

Схема испытания представлена на рисунке 5.

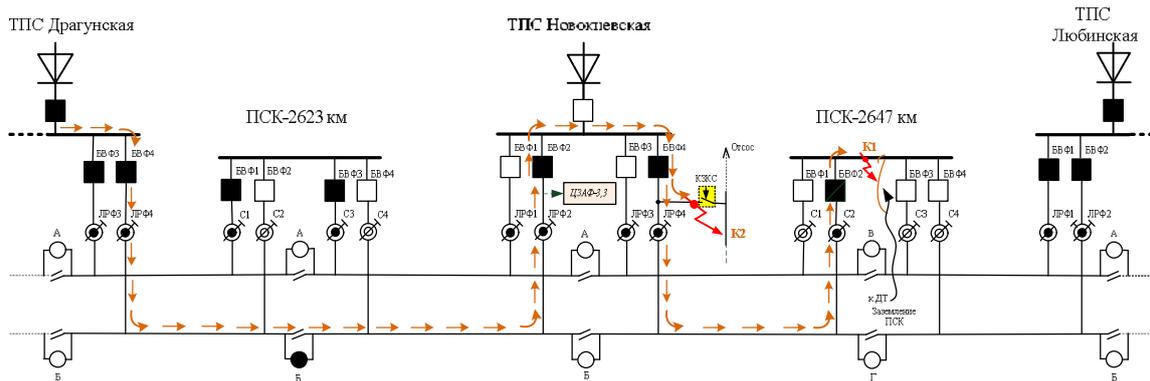


Рисунок 5 – Схема питания и секционирования контактной сети на участке Драгунская – Любинская

В результате испытания получена осциллограмма процесса срабатывания короткозамыкателя, представленная на рисунке 6. Как и предполагалось, осциллограмма имеет четыре характерных временных интервала:

- 1) нормальный предаварийный режим работы – $U \approx 3800 \text{ В}$, $I \approx 0 \text{ А}$;
- 2) включение контактной сети на короткое замыкание (КЗ) в «мертвой» зоне – $U \approx 1600 \text{ В}$, $I \approx 2300 \text{ А}$;
- 3) срабатывание КЗКС через 130 мс после КЗ – $U \approx 0 \text{ В}$, $I \approx 3000 \text{ А}$;
- 4) коммутационные процессы и установившийся режим – $U \approx 3800 \text{ В}$, $I \approx 0 \text{ А}$.

Результаты измерений, полученные при проведении испытания, свидетельствуют о правильности работы КЗКС-3,3.

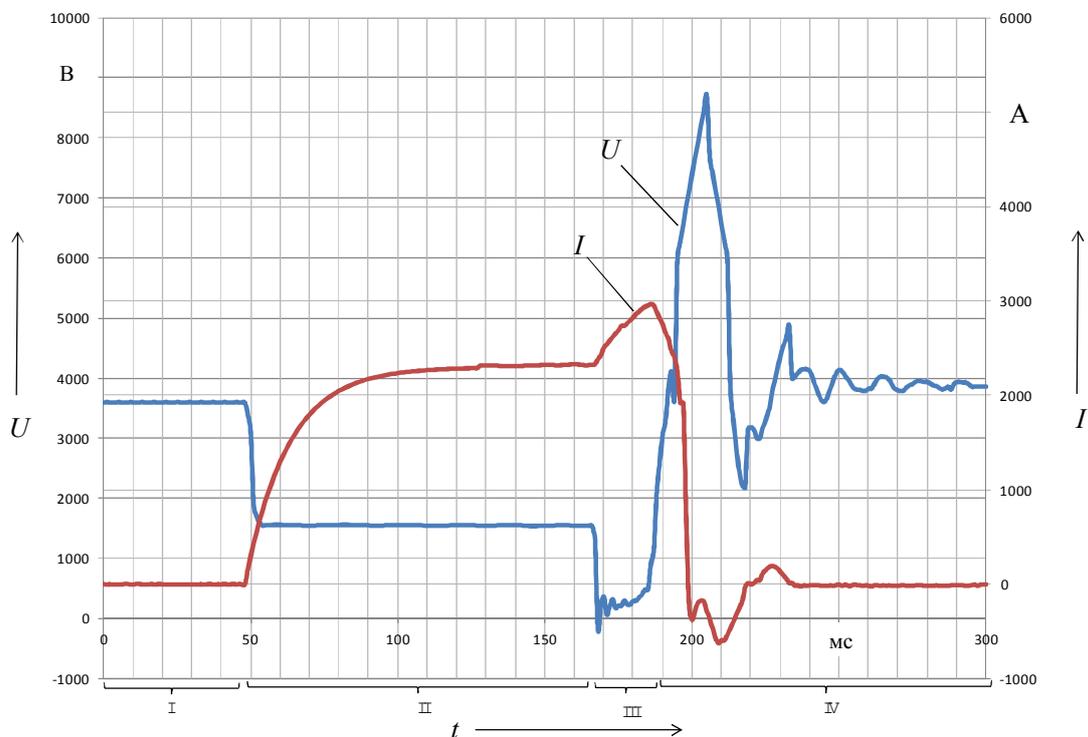


Рисунок 6 – Осциллограмма процесса срабатывания КЗКС-3,3 кВ

По результатам проведенного испытания можно сделать следующие выводы о работе короткозамыкателя и дальнейших направлениях работы с учетом основных тезисов [15]:

- 1) получены положительные результаты испытаний короткозамыкателя на базе однофазного коммутационного модуля ВВ/TEL-24-12,5-1000 в составе потенциальной защиты контактной сети в вынужденном режиме при выводе в ремонт РУ-3,3 тяговой подстанции;
- 2) требуется завершение разработки схемы управления короткозамыкателем с использованием в качестве источника питания энергии контактной сети;
- 3) необходимо провести работы по адаптации короткозамыкателя для работы в составе защиты при опорах, не соединенных с рельсами.

Список литературы

1. Руководство по эксплуатации. Устройство цифровых защит и автоматики фидеров ЦЗАФ-3,3 [Текст]. СПб: НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2005. – 65 с.
2. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
3. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
4. Автоматика и телемеханика электроснабжающих устройств [Текст] / Г. В. Дмитриевский, В. Я. Овласюк и др. – М.: Транспорт, 1982. – 230 с.
5. СТО РЖД 07.021.1-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 33 с.
6. СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 13 с.
7. СТО РЖД 07.021.5-2018. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2018. – 107 с.
8. Приказ «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» № ЦТ-24, [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 58 с.
9. Приказ «О допустимых межпоездных интервалах по устройствам тягового электроснабжения» № 58-Н [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 60 с.
10. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
11. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог (сборник справочных материалов) [Текст] / ОАО «РЖД», филиал «Проектно-конструкторское бюро по электрификации железных дорог». – М.: Трансиздат, 2004. – 384 с.
12. Прохорский, А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции [Текст] / А. А. Прохорский. – М.: Транспорт, 1983 г. – 496 с.
13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст] / Госэнергонадзор Минэнерго России, ЗАО «Энергосервис». – М., 2003. – 392 с.
14. Правила устройства электроустановок [Текст] / ЗАО «Энергосервис», – М., 2003. – 608 с.
15. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г. [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 96 с.

References

1. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Ustroystvo tsifrovyykh zashchit i avtomatiki fiderov TSZAF-3,3.* (Instruction manual. The device of digital protection and automation of feeders ZSAF-3,3) ООО НИИЭФА-ЭНЕРГО, St. Petersburg, 2005, 65 p.

2. Serdinov S.M. *Povysheniye nadezhnosti elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Increase of reliability of power supply devices of electrified railways). Moscow: Transport, 1985, 301 p.
3. Wexler M.I. *Zashchita tyagovoy seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo замыкания* (Protection of traction DC network against short-circuit currents). Moscow: Transport, 1976, 120 p.
4. Dmitrievsky GV, Ovlyasyuk V.Ya., Suhoprudsky N.D. *Avtomatika i telemekhanika elektrosnabzhayushchikh ustroystv* (Automation and telemechanics of power supply devices). Moscow: Transport, 1982, 230 p.
5. *STO RZHD 07.021.1-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий peregruzki. Chast' 1. Obshchiye printsipy i pravila postroyeniya zashchitnykh blokirovok i avtomatiki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya»* (SRT RZD 07.021.1-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 1. General principles and rules for constructing protections, locks and automatics in traction power supply systems»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 33 p.
6. *STO RZHD 07.021.2-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya ustavok blokirovok i vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya»* (STR RZD 07.021.2-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 2. The method of choosing action algorithms, blocking settings and time delays of automation in the traction power supply system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 13 p.
7. *STO RZHD 07.021.5-2018 «Zashchita system elektrosnabzheniy azheleznoy dorogi ot korotkikh замыканий i peregruzki. Chast'5. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka»* (STR RZD 07.021.5-2018 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 5. Method of selection of protection settings in the DC traction system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2018, 107 p.
8. *Prikaz «Ob ustanovlenii norm mass i dlinn passazhirskikh i gruzovykh poyezdov na uchastkakh, obsluzhivayemykh Zapadno-Sibirskoy direktsiyey tyagi»* (The order «On the establishment of the norms of masses and lengths of passenger and freight trains on the sections serviced by the West Siberian Thrust Directorate»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2016, 58 p.
9. *Prikaz «O dopustimyykh mezhpoyezdnykh intervalakh po ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya»* (The order «About admissible inter-train intervals for devices of traction power supply»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2011, 60 p.
10. Marquardt C. G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Electrosupply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
11. A collection of reference materials *«Silovoye oborudovaniye tyagovykh podstantsiy zheleznykh dorog»* (Power equipment of traction substations of railways), JSC Russian Railways, a branch of the Design Bureau for the Electrification of Railways. Moscow: Transsident, 2004, 384 p.
12. Prokhorsky A. A. *Tyagovyye i transformatornyye podstantsii* (Traction and transformer substations). Moscow: Transport, 1983, 496 p.
13. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley*. (Rules of technical operation of electrical installations of consumers). Gosenergonadzor of the Ministry of Energy of Russia. Moscow, ZAO Energoservice, 2003, 392 p.
14. *Pravila ustroystva elektroustanovok*. (Rules for the installation of electrical installations). Edition Moscow, ZAO Energoservis, 2003, 608 p.
15. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda*. (Energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period until 2015 and for the future until 2030). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2011, 96 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кондратьев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 31-34-46.

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

Кващук Валентин Андреевич

Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению, Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД».

Леконта ул., д. 20, г. Омск, 644044, Российская Федерация.

Электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории.

Тел.: (3812) 44-27-67.

Хусаинов Ермек Кенжебулатович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-27-61.

E-mail: husainov0908@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кондратьев, Ю. В. Обеспечение защиты контактной сети постоянного тока при вынужденных режимах [Текст] / Ю. В. Кондратьев, В. А. Кващук, Е. К. Хусаинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 87 – 95.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kondratiev Yuri Vladimirovich

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», OmGUPS.

Phone.: (3812) 31-34-46.

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

Kvaschuk Valentin Andreevich

West-Siberian Directorate for Energy Supply, Transenergo - branch of JSCo «Russian Railways».

20, Leconta st., Omsk, 644044, Russian Federation.

Electromechanics of the Road Electrotechnical Laboratory.

Phone: (3812) 44-27-67.

Khusainov Yermek Kenzhebulatovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

Phone: (3812) 44-27-61.

E-mail: husainov0908@rambler.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kondratiev Yu. V., Kvaschuk V. A., Khusainov E. K. The protection of the contact network of a direct current at forced modes. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 87 – 95 (In Russian).

УДК 621.316

Е. А. Третьяков, Г. Е. Головнев

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Аннотация. Актуальность работы связана с совершенствованием компонентов распределенной системы автоматизации и управления напряжением в рамках развития активно-адаптивных электрических сетей. Представлен подход к определению управляющих воздействий в рамках координированного управления напряжением в распределительных электрических сетях с помощью активных элементов на основе мультиагентного управления. Управление напряжением в электрической сети осуществляется всеми ло-

кальными регуляторами в границах контролируемой зоны по условию стабилизации напряжений. Управляющие воздействия локальных агентов определяются в результате координации между собой по типу «аукцион», решения линейризованной оптимизационной задачи на основе чувствительности мест расположения активных элементов к изменению напряжений в распределительной электрической сети. Чувствительность параметров режима к инъекциям мощностей в узлах электрической сети определяется на основе сенсорного анализа по проводимости элементов топологии сети и частным производным небаланса составляющих электрических величин. Достижение глобальной цели управления агентов-координаторов достигается оптимизацией параметров режима и корректировкой работы локальных агентов. Представленные результаты моделирования на тестовой электрической схеме показали реализуемость и эффективность предложенных подходов.

Ключевые слова: напряжение, активные элементы, распределенное управление, оптимизация, управляющие воздействия, матрица чувствительности, активно-адаптивные электрические сети.

Evgeny A. Tretyakov, Grigory E. Golovnev

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

DETERMINATION OF IMPACT IN INTELLIGENT VOLTAGE CONTROL SYSTEM IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

Abstract. The urgency of the work is connected with the improvement of the components of the distributed automation system and voltage control within the framework of the development of actively adaptive electrical networks. An approach is presented to the determination of control actions within the framework of coordinated voltage control in distribution electrical networks using active elements based on multi-agent control. Voltage control in the electric network is carried out by all local regulators within the boundaries of the controlled zone under the condition of voltage stabilization. The control actions of local agents are determined as a result of coordination between each other in the type of "auction", the solution of the linearized optimization problem based on the sensitivity of the locations of the active elements to the change in voltages in the distribution network. The sensitivity of the parameters of the regime to the injection of power in the nodes of the electrical network is determined on the basis of sensory analysis of the conductivity of the network topology elements and the partial derivative of the unbalance of the constituent electrical quantities. Achieving the global goal of managing coordinating agents is achieved by optimizing the mode parameters and adjusting the work of local agents. The presented simulation results on the test circuit showed the feasibility and effectiveness of the proposed approaches..

Keywords: voltage, active elements, distributed control, optimization, control actions, sensitivity matrix, actively-adaptive electrical networks.

Требования к перспективным интеллектуальным электрическим сетям изложены в ряде нормативных документов [1, 2]. Основные компоненты таких электрических сетей включают в себя следующее:

основное электротехническое (первичное) оборудование (измерительные трансформаторы тока и напряжения, коммутационные аппараты, маслонаполненное трансформаторное оборудование, оборудование системы оперативного постоянного тока, линейные регуляторы, источники реактивной мощности и т. д.);

средства контроля, защиты и управления;

средства коммуникации и интеграции в архитектуре управления и контроля («станционная шина», «технологическая шина», пропускная способность, механизм межподстанционного обмена, обмен с диспетчерскими пунктами);

основные технологические информационные и управляющие системы и подсистемы (подсистема оперативного контроля и оперативного автоматизированного управления оборудованием подстанций, подсистема устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и противоаварийной автоматики (ПА), подсистема регистрации аварийных событий и процессов, подсистема организации векторных измерений тока и напряжения, подсистема мониторинга состояния силового электрооборудования, инженерных и вспомогательных систем, подсистема АИИС КУЭ, подсистема контроля качества электроэнергии, подсистема сбора и пере-

дачи оперативной и неоперативной технологической информации в центры управления сетями);

программное и информационное обеспечение (системное, инструментальное, технологическое программное обеспечение, структура информационных потоков, организация баз данных (БД) и архивов, описание оборудования и сигналов ЦПС в терминах стандартов МЭК 61968 / 61970 и IEC 61850).

Одной из основных задач при совершенствовании распределенной системы управления напряжением в рамках развития интеллектуальных электрических сетей является определение управляющих воздействий на активные элементы эклектической сети для целей указанного управления.

В основном определение управляющих воздействий выполняется на основе оптимизации режима электрической сети по активной и реактивной мощности, что в реальном времени является затруднительным [3]. При этом указанный режим должен быть допустимым по качеству электроэнергии и надежности электроснабжения.

В инженерной практике [3 – 7] задачи оптимизации режима электрической сети решают отдельно по мощности, напряжению и коэффициенту трансформации. При этом соблюдается следующая иерархия задач:

- 1) регулирование напряжения;
- 2) регулирование коэффициентов трансформации;
- 3) размыкание сетей;
- 4) оптимизация реактивной мощности.

Обычно оптимизация установившегося режима производится методом Ньютона [8]. Целевая функция имеет вид:

$$P_{\text{loss}} = \Delta P + \sum_{i=1}^{n1} H_{iU} + \sum_{j=1}^{n2} H_{jQ} + \sum_{k=1}^{n3} H_k, \quad (1)$$

где $n1$ – количество узлов электрической сети; $n2$ – количество источников реактивной мощности; $n3$ – количество трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (рпн).

Как правило, указанная задача решается методами линейного и нелинейного программирования. При этом из-за линеаризации нелинейной функции возникает неточность, а также невозможно учесть логические операции. Эти проблемы решены в эволюционных алгоритмах оптимизации, но их решение требует определенного времени, которого почти нет при оперативном управлении режимами электрической сети [11, 12].

В общем случае оптимизация режима в распределительной электрической сети заключается в следующем: требуется найти вектор управляющих параметров S_{opt} и вектор параметров состояния M_{opt} , чтобы целевая функция F достигала экстремального значения при условии соблюдения ограничений на управляющие параметры и параметры состояния:

$$\begin{cases} F(S_{\text{opt}}) \rightarrow \min; \\ S_{\text{opt}} = (Y, T, Q, P, A); \\ M_{\text{opt}} = (U_j^{\text{opt}}, P_j^{\text{opt}}, Q_j^{\text{opt}}), j = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (2)$$

где Y – вектор проводимости устройств продольной емкостной компенсации в ветви; T – вектор коэффициентов трансформации трансформаторов с РПН; Q – вектор реактивной мощности компенсирующего устройства (КУ); P – вектор активной мощности распределен-

ной генерации или накопителей энергии в узле; A – вектор положения коммутационных аппаратов (0 или ∞).

Ограничения к целевой функции (2) содержат условия по допустимым значениям параметров состояния.

Как указывалось ранее, прямое решение оптимизационной задачи в виде (2) для целей оперативного управления напряжением в реальном времени не представляется возможным для типовой распределительной электрической сети. В рамках мультиагентной двухуровневой системы управления напряжением [9] предлагается использовать оптимизационную задачу в виде (2) для решения глобальной цели управления, а для достижения локальных «быстрых» задач отдельных агентов использовать функцию цели:

$$\Delta U_D = k_p \Delta P + k_Q \Delta Q \rightarrow \min, \quad (3)$$

где k_p, k_Q – коэффициенты по активной и реактивной мощности; $\Delta U_D = \sqrt{\sum_{k=1}^N (U_k - 1)^2}$.

Определение управляющих воздействий $\Delta P, \Delta Q$ всех активных элементов электрической сети является предметом настоящего исследования.

Рассматриваемая система управления напряжением в электрической сети включает в себя подсистему оценивания состояния электрической сети, принятия решений и выдачи управляющих воздействий. Таким образом, управляющие воздействия на активные элементы электрической сети для стабилизации напряжений определяются не только в результате решения оптимизационной задачи, но и в результате координированного сравнения влияющих факторов на основе агентного подхода.

В работе [10] представлены основные принципы координации в многоуровневых системах. Наиболее известным алгоритмом координации является согласование локальных показателей качества отдельных агентов между собой, оптимизация которых приводит к достижению глобальной цели.

Применяемый алгоритм координации активных элементов электрической сети (агентов), реализующий процедуру аукциона, является итерационным и включает в себя последовательность шагов, связанных с формированием «стоимости» достижения целей каждым агентом, их сортировкой в порядке возрастания цены, с определением победителя, с повторным формированием ценового массива агентов и т. д., пока все цели не будут распределены между агентами.

Очевидно, что координация управляющих воздействий на активные элементы электрической сети должна учитывать не только стоимостные подходы, но и чувствительность напряжений к величине и месту приложения указанных воздействий в электрической сети.

Для установившихся режимов выявление сенсорных и когерентных элементов электрической сети осуществляется через анализ соответствующих матриц сопротивлений (проводимости) и матриц Якоби (матрица частных производных вторичных параметров режима в случае описания в форме баланса мощностей) в декартовой и полярной системах координат. Известный метод приращений [5] для оценки локальной чувствительности узлов электрической сети не используется из-за значительной методической погрешности.

Если при анализе установившихся режимов возмущающими воздействиями являются изменения токов в узлах, то реакция электрической сети в виде изменения напряжений в узлах

$$\Delta U = Y^{-1} \Delta I = Z \Delta I, \quad (4)$$

где z – матрица собственных и взаимных сопротивлений узлов.

Если в качестве возмущений рассматриваются изменения активных и реактивных мощностей, то реакция электрической сети определяется уже из системы нелинейных уравнений.

В линеаризованном виде эти соотношения связывают возмущения ΔW и реакции ΔX через матрицу Якоби ($\frac{\partial W}{\partial X}$) этих систем уравнений:

$$\frac{\partial W}{\partial X} \Delta X = \Delta W. \quad (5)$$

Матрица Якоби в силу нелинейности в определенной мере зависит от режима электрической сети. Соответственно эта зависимость принимается во внимание при анализе чувствительности электрической сети с помощью данной матрицы. Матрица Якоби взаимосвязана с матрицей проводимостей $Y = Z^{-1}$.

Сенсорные узлы являются наиболее «слабыми» местами электрической сети. Таким образом, сенсорный анализ показывает, какие именно узлы оказывают наибольшее влияние при изменении активной и реактивной мощности в них на изменение напряжения во всех узлах электрической сети, и позволяет определить величину необходимых управляющих воздействий в виде приращений активной и реактивной мощности для линейного регулятора для стабилизации напряжения.

В качестве тестовой схемы для моделирования предложенных подходов возьмем участок распределительной электрической сети напряжением 35 кВ с трансформаторной подстанцией (ТП) в центре питания И-110 кВ (рисунок 1).

Работа рассматриваемого участка электрической сети в замкнутом режиме не осуществляется.

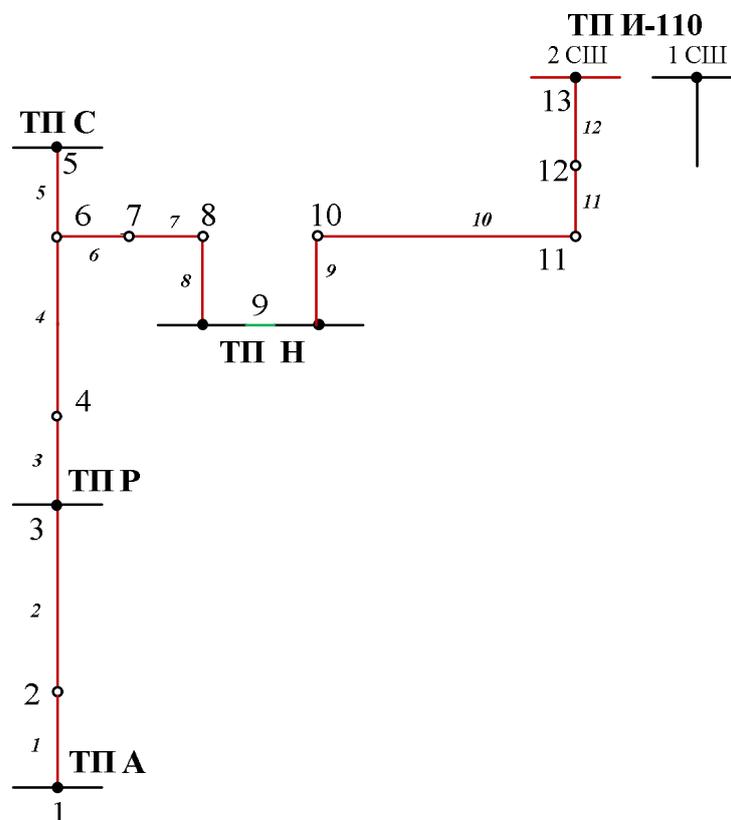


Рисунок 1 – Схема рассматриваемой электрической сети напряжением 35 кВ

Нормальный режим электрической сети, характеризующийся допустимыми областями режимных параметров, определяется коэффициентами запаса по активной мощности, по напряжению, по допустимой перегрузке и др.

Основной задачей при координации средств регулирования напряжением является определение доли их участия в каждый момент времени в стабилизации напряжения.

Установленная мощность трансформаторов:

$$\begin{cases} S_T \geq \frac{P_{\max}}{n_T}; \\ S_T \geq \frac{P_{\text{ав}}}{k_{\text{ав}}(n_T - n_{\text{отк}})}, \end{cases} \quad (6)$$

где n_T , S_T – количество и мощность трансформаторов; P_{\max} – максимальная нагрузка подстанции в нормальном режиме; $P_{\text{ав}} = P_{\max} - P_{\text{рез}}$ – нагрузка подстанции в послеаварийном режиме после выхода из работы одного трансформатора; $P_{\text{рез}}$ – резервируемая часть нагрузки подстанции по сетям вторичного напряжения; $n_{\text{отк}}$ – количество отключенных трансформаторов; $k_{\text{ав}}$ – допустимый коэффициент перегрузки трансформатора в аварийных случаях.

На рисунке 2 для участка электрической сети, который получает питание от второй системы сборных шин (СШ) ТП И-110, представлены значения элементов матрицы узловых сопротивлений Z и проводимостей Y с учетом емкостных проводимостей поперечных ветвей.

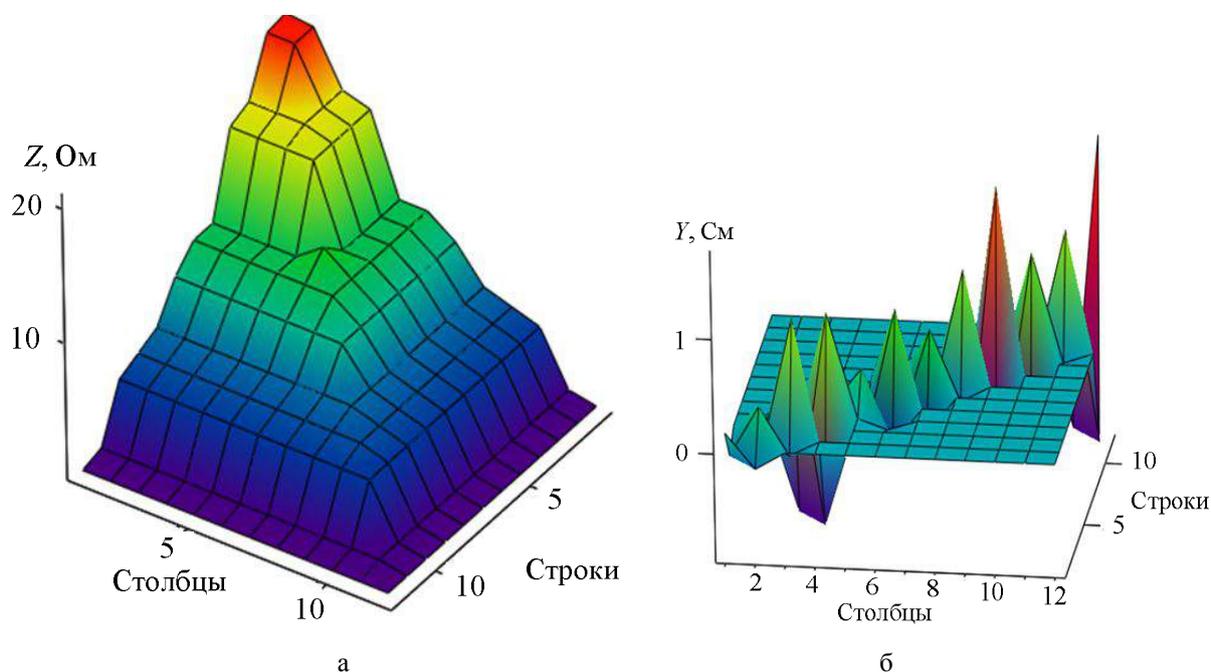


Рисунок 2 – Значения элементов матрицы узловых сопротивлений Z и проводимостей Y (2 СШ И-110)

Из рисунка 2 следует, что максимальные элементы матрицы Z (диагональные элементы) и минимальные элементы матрицы Y соответствуют узлам 1 (ТП А) и 5 (ТП С), которые являются сенсорными.

Определение чувствительности узлов электрической сети можно выполнить также через элементы используемой в расчетах режимов ньютоновскими методами матрицы Якоби.

Итерационная формула метода Ньютона запишется в виде:

$$\begin{cases} U^{(k+1)} = U^{(k)} - \Delta U^{(k+1)}; \\ \Delta U^{(k+1)} = \left[\frac{\partial W_i}{\partial U_j} \right]_{U^k}^{-1} \cdot [W(U^{(k)})]. \end{cases} \quad (7)$$

Для выявления сенсорных узлов, параметры режима которых наиболее чувствительны к таким внешним возмущениям, как изменение активных ΔP и реактивных ΔQ нагрузок, используется линеаризованное уравнение:

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\Delta \delta$, ΔU – изменения фаз и модулей напряжения; J – матрица якоби для баланса мощности в полярных координатах, имеющая структуру $J = \begin{pmatrix} J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q\delta} & J_{QU} \end{pmatrix}$.

Величина управляющих воздействий по активной и реактивной мощности (после решения оптимизационной задачи) на узлы электрической сети определяется на основе уравнений:

$$\begin{cases} \Delta P = (J_{PU} - J_{P\delta} J_{Q\delta}^{-1} J_{QU}) \Delta U; \\ \Delta Q = (J_{QU} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{QU}) \Delta U. \end{cases} \quad (9)$$

На рисунке 3 представлены результаты расчетов частных производных небалансов (диагональных элементов матрицы Якоби в полярных координатах).

Максимальные значения чувствительности напряжения в исследуемой схеме 2 СШ ТП И-110 к изменению активной мощности соответствуют узлу 1 (ТП А), к изменению реактивной мощности – узлу 5 (ТП С).

Анализ потоков мощности и потерь активной и реактивной мощности по линиям свидетельствует о неоднородности электрической сети. Например, при протекании по линиям 9 и 10 (рисунок 1) одинаковой мощности нагрузки разница в потерях мощности в них достигает более трех раз (рисунок 4). Это объясняется различием в типе используемых проводов и в длинах указанных линий электрической сети.

Для рассматриваемого участка электрической сети по выражениям (9) и (3) были определены мгновенные оптимальные управляющие воздействия для линейных регуляторов – источников реактивной мощности (рисунок 5), установленных в узлах 3 и 5 (ТП Р и ТП С соответственно), для снижения заданных отклонений напряжений в электрической сети при условии задания одинаковой «стоимости» выработки реактивной мощности указанными устройствами (равенство между собой коэффициентов k_Q).

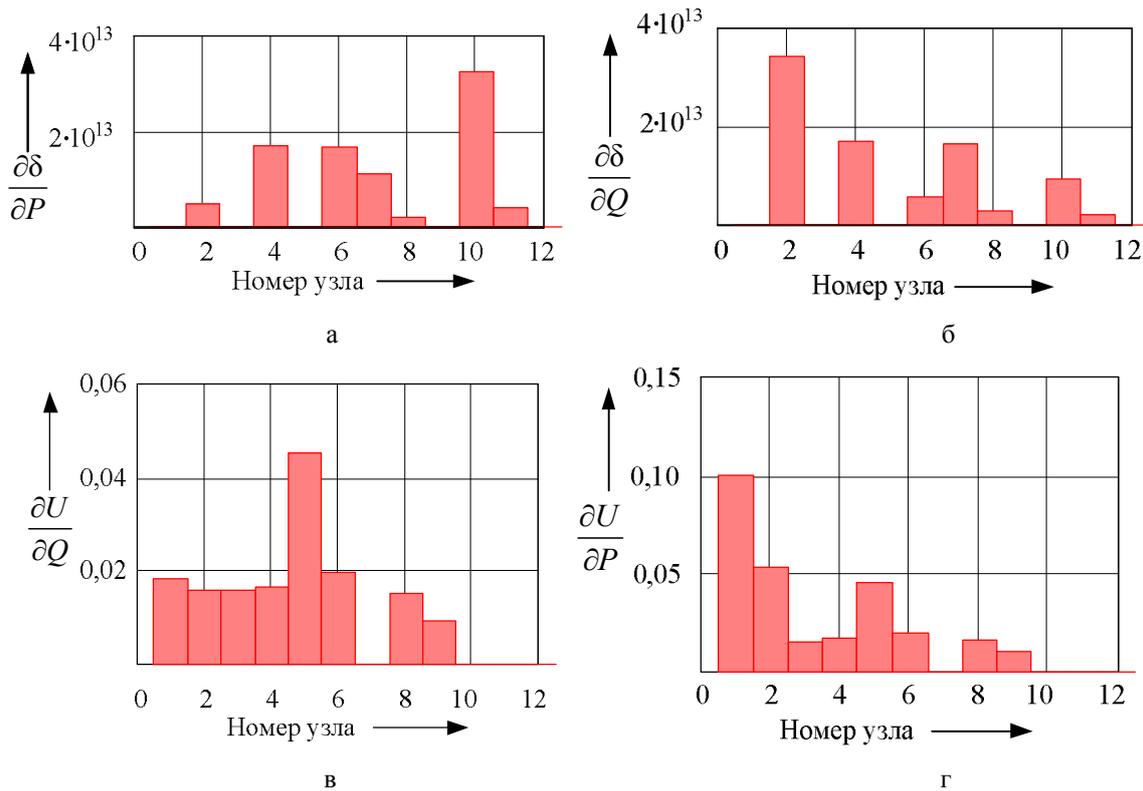


Рисунок 3 – Визуализация матрицы чувствительности (диагональных элементов обратного Якобиана) 2 Ш И-110

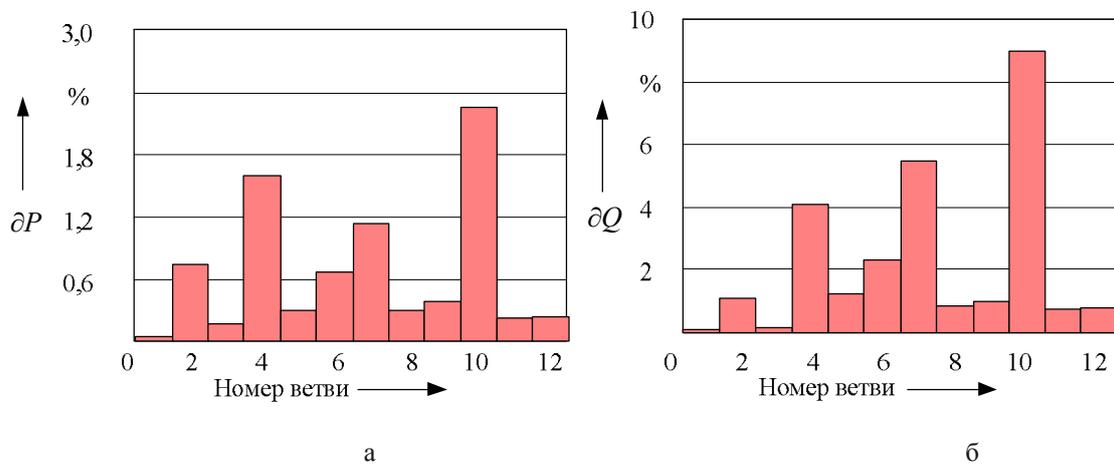


Рисунок 4 – Потери активной (а) и реактивной (б) мощности в линиях рассматриваемого участка электрической сети

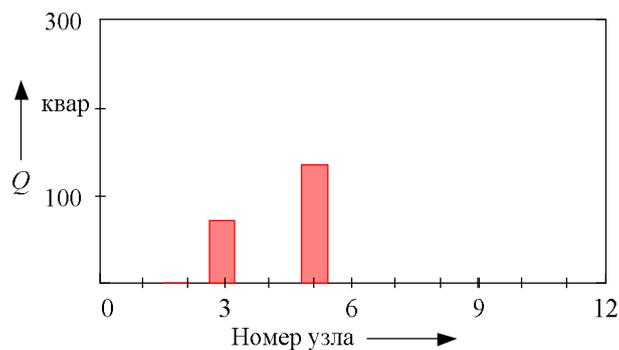


Рисунок 5 – Расчетные управляющие воздействия источников реактивной мощности

Моделирование участка электрической сети с центром питания 2 СШ И-110 выполнено в Matlab Simulink. На рисунке 6 представлено снижение падения напряжений в линиях и потерь активной мощности в них по сравнению с исходным состоянием после реализаций управляющих воздействий в узлах 3 и 5 (ТП Р и ТП С соответственно) рассматриваемого участка электрической сети.

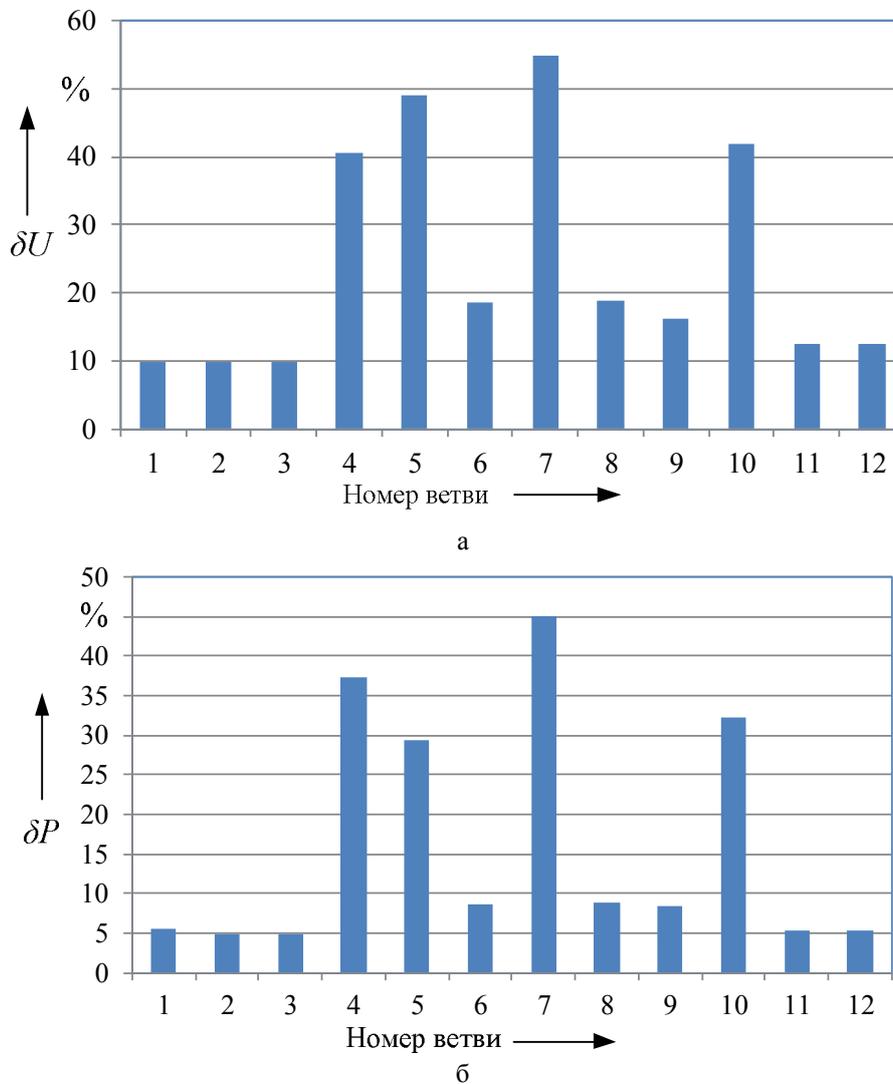


Рисунок 6 – Снижение падения напряжения в линиях (а) и потерь активной мощности (б) в них после реализации рассматриваемых управляющих воздействий

Как показали представленные результаты, реализация указанных управляющих воздействий приведет к снижению падения напряжений на шинах ТП от 10 до 55 % и снижению потерь активной мощности в линиях тестового участка электрической сети от 4 до 45 %.

Таким образом, сенсорный анализ показал, какие именно узлы оказывают наибольшее влияние при изменении активной и реактивной мощности в них на изменение напряжения во всех узлах электрической сети. Ранжирование элементов электрической сети по уровню сенсорности позволяет оценить границы влияния линейных регуляторов на режим напряжения и определить линии, ограничивающие пропускную способность.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности определения управляющих воздействий на основе чувствительности узлов электрической сети к инъекциям активной и реактивной мощностей, координации между активными элементами и реше-

ния линеаризованной оптимизационной задачи в рамках мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях в реальном времени.

Список литературы

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации (на период до 2030 года) [Текст] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2013. – № 14. – С. 1738 – 1787.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [Электронный вариант]. Утв. советом директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252). – М., 2017.
3. Веников, В. А. Электрические сети [Текст] / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков. – М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
4. Пантелеев, В. И. Многоцелевая оптимизация и автоматизированное проектирование управления качеством электроснабжения в электроэнергетических системах: Монография [Текст] / В. И. Пантелеев, Л. Ф. Поддубных / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск, 2009. – 194 с.
5. Исмоилов, С. Т. Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией [Текст] / С. Т. Исмоилов, А. Г. Фишов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский ун-т водного транспорта. – Новосибирск. – 2014. – № 1-2. – С. 302 – 305.
6. Герасименко, А. А. Оптимальная компенсация реактивной мощности в системах распределения электрической энергии: Монография [Текст] / А. А. Герасименко, В. Б. Нешатаев / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск, 2012. – 218 с.
7. Калентионок, Е. В. Оперативное управление в энергосистемах: Учебное пособие [Текст] / Е. В. Калентионок, В. Г. Прокопенко, В. Т. Федин. Минск: Высшая школа, 2007. – 351 с.
8. Сеславин, А. И. Исследование операций и методы оптимизации [Текст] / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина / УМЦ ЖДТ. – М., 2015. – 200 с.
9. Пат. № 2587128 Российская Федерация, МПК В60М 3/02, Н02J 13/00, G05В 19/04. Способ управления системой электроснабжения железных дорог / Третьяков Е. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015103374/11; заявл. 02.02.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. – 4 с.
10. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: Пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
11. Осика, Л. К. Инжиниринг объектов интеллектуальной энергетической системы. Проектирование. Строительство. Бизнес и управление [Текст] / Л. К. Осика. – М.: МЭИ, 2014. – 780 с.
12. Крюков, А. В. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог: Монография [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – 129 с.

References

1. *Strategiya razvitiya ehlektrosetevogo kompleksa Rossijskoj Federacii (na period do 2030 goda)* (Strategy of development of the power grid complex of the Russian Federation (for the period up to 2030), Moscow, Collection of Legislation of the Russian Federation, 2013, no. 14, pp. 1738 – 1787.
2. *Polozhenie PAO «Rosseti» «O edinoj tekhnicheskoy politike v ehlektrosetevom komplekse»* (The Position of PJSC «Rosseti» «On the unified technical policy in electric grid complex»), Moscow, PJSC «Rosseti» Publ., 2017.
3. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A. *Ehlektricheskie seti* (Electrical networks). Moscow, 1998. 511 p.

4. Panteleev V. I., Poddubnykh L. F. *Mnogocелевая optimizaciya i avtomatizirovannoe proektirovanie upravleniya kachestvom ehlektrosnabzheniya v ehlektroehnergeticheskikh sistemah* (Multi-purpose optimization and automated design of power quality management in electric power systems). Krasnoyarsk: SFU Publ., 2009, 194 p.
5. Ismoilov S. T., Fishov A. G. Modeling and analysis of the efficiency of voltage regulation in an electrical network with distributed generation [Modelirovanie i analiz ehffektivnosti regulirovaniya napryazheniya v ehlektricheskoy seti s raspredelennoj generaciej]. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2014, no. 1-2, pp. 302 – 305.
6. Gerasimenko, A. A. *Optimal'naiia kompensatsiia reaktivnoi moshchnosti v sistemakh raspredeleniia elektricheskoi energii: monografiia* (Optimal compensation of reactive power in electric power distribution systems: monograph). Krasnoyarsk: SFU, 2012, 218 p.
7. Kalentionok, E. V., Prokopenko V. G., Fedin V. T. *Operativnoe upravlenie v energosistemakh: uchebnoe posobie* (Operational management in power systems: a tutorial). Minsk: «Vysshiaia shkola», 2007, 351 p.
8. Seslavin A. I., Seslavina E. A. *Issledovanie operacij i metody optimizacii* (Operations research and optimization methods). Moscow: UMC ZDT Publ., 2015, 200 p.
9. Tretyakov E. A. Patent RF 2587128, 10.06.2016.
10. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod* (Artificial intelligence: a modern approach). Moscow: Williams Publ., 2006, 1408 p.
11. Osika, L. K. *Inzhiniring ob"ektov intellektual'noi energeticheskoi sistemy. Proektirovanie. Stroitel'stvo. Biznes i upravlenie* (Engineering of objects of intellectual energy system. Design. Building. Business and management). Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2014, 780 p.
12. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Operativnoe upravlenie v sistemakh ehlektrosnabzheniya zheleznyh dorog* (Operational management in the systems of power supply of the railroads). Irkutsk, 2012, 129 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Третьяков Евгений Александрович

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.

Головнев Григорий Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (913) 612-13-25.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Третьяков, Е. А. Определение воздействий в интеллектуальной системе управления напряжением в распределительных электрических сетях / Е. А. Третьяков, Г. Е. Головнев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 95 – 105.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tretyakov Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

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

Golovnev Grigory Evgenevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Graduate of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (913) 612-13-25.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tretyakov E. A., Golovnev G. E. Determination of impact in intelligent voltage control system in distribution electric networks. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 95 – 105 (In Russian).

УДК 621.316.722.076.12

Н. К. Шурова

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

УСИЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСЛОВИЯХ ПРОПУСКА ПОЕЗДОВ ПОВЫШЕННОЙ МАССЫ

Аннотация: В работе рассмотрены основные лимитирующие факторы, ограничивающие объем перевозок грузовых поездов повышенной массы. Обозначены подходы к решению представленных проблем применением компенсирующих устройств. В работе представлена методика выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств в тяговой сети с учетом роста объемов перевозок, позволяющая оценить положительный эффект от установки компенсирующих устройств на перспективу увеличения объемов перевозок. Определение перспективного электропотребления предлагается осуществлять с помощью прогнозирования электропотребления. Для оценки эффекта от установки компенсирующих устройств в тяговой сети предложены три критерия: разгрузка тяговых трансформаторов, повышение уровня напряжения у потребителя, разгрузка питающих линий электропередач.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, тяговая сеть, загрузка трансформатора, потери напряжения, прогнозирование, электропотребление.

Natalia K. Shurova

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

STRENGTHENING THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM OF ACCURRENT BY THE APPLICATION OF COMPENSATING DEVICES IN THE CONDITIONS OF INCREASED MASS TRAIN HANDLING

Abstract. The paper discusses the main limiting factors limiting the volume of transportation of high-volume freight trains. Designated approaches to solving the problems presented by the use of compensating devices. The paper presents the method of selecting installation sites and the power of compensating devices in the traction network, taking into account the growth in traffic volumes, allowing to evaluate the positive effect of the installation of compensating devices on the prospect of increasing traffic volumes. Determination of perspective power consumption is proposed to carry out using power consumption forecasting. To assess the effect of the installation of compensating devices in the traction network, three criteria have been proposed: unloading traction transformers, increasing the voltage level at the consumer, and unloading the power transmission lines.

Keywords: reactive power compensation, traction power supply system, transformer load, voltage loss, prognostication, power consumption.

Железнодорожный транспорт переменного тока является крупным потребителем реактивной энергии. При рассмотрении структуры электропотребления участка Дальневосточной железной дороги (ДВЖД) было выявлено, что в 2015 – 2017 гг. значительно выросло потребление реактивной энергии на тягу поездов. В указанные годы объемы потребляемой реактивной энергии практически сравнялись с потреблением активной энергии на тягу поездов. По приблизительным оценкам в 2017 г. коэффициент активной мощности ($\cos \varphi$) в среднем для рассматриваемого участка составил 0,73, а коэффициент реактивной мощности ($\operatorname{tg} \varphi$) – 0,93 [1].

С 2015 г. минимальные и максимальные значения коэффициентов реактивной мощности устанавливаются индивидуально для каждого потребителя по результатам расчетов в каждой точке поставки электрической энергии [2]. По этой причине нельзя установить единый критерий для потребления реактивной энергии тяговыми подстанциями. Однако снижать потребление реактивной энергии необходимо, так как она загружает линии электропередач, трансформаторы подстанций, вызывая дополнительные потери напряжения и мощности.

На рисунке 1 представлены величины среднегодовых загрузок трансформаторов тяговых подстанций участка ДВЖД. Как видно из рисунка 1, среднегодовая суммарная нагрузка тяговой подстанции не превышает номинальной мощности одного тягового трансформатора, равной 40 МВ·А. Ограничивающим фактором является пиковая нагрузка в момент прохода поезда повышенной массы по межподстанционной зоне, которая превышает среднюю примерно в 2,7 раза.

Как видно из рисунка 2, в структуре потребления электрической энергии отдельными тяговыми подстанциями преобладает реактивная энергия. За счет ее снижения возможно уменьшение загрузки трансформаторов.

В соответствии с ГОСТ14209-85 [3] при условиях, когда температура окружающего воздуха 20 °С, предшествующая нагрузка равна 50 % от номинальной, длительность перегрузки 2 часа, коэффициент перегрузки принимается равным 1,6. К тому же в источнике [4] показано, что на лимитирующем перегоне ДВЖД коэффициент перегрузки тягового трансформатора не превышает 1,5.

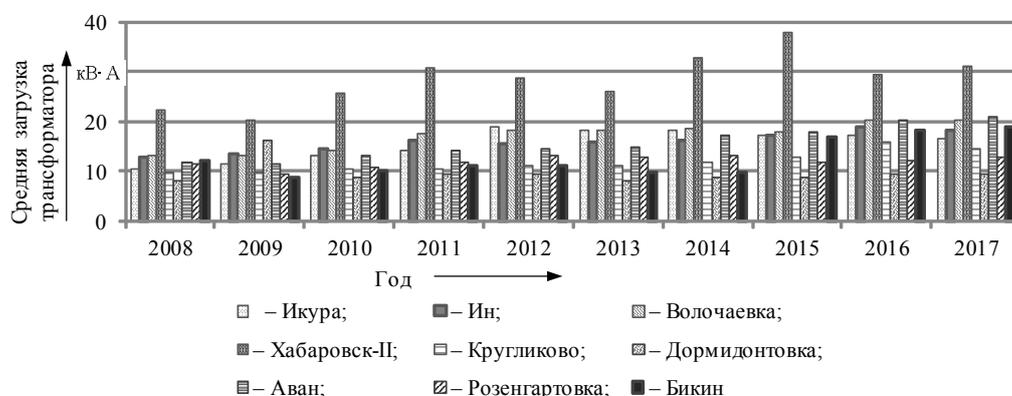


Рисунок 1 – Загрузка тяговых подстанций участка ДВЖД

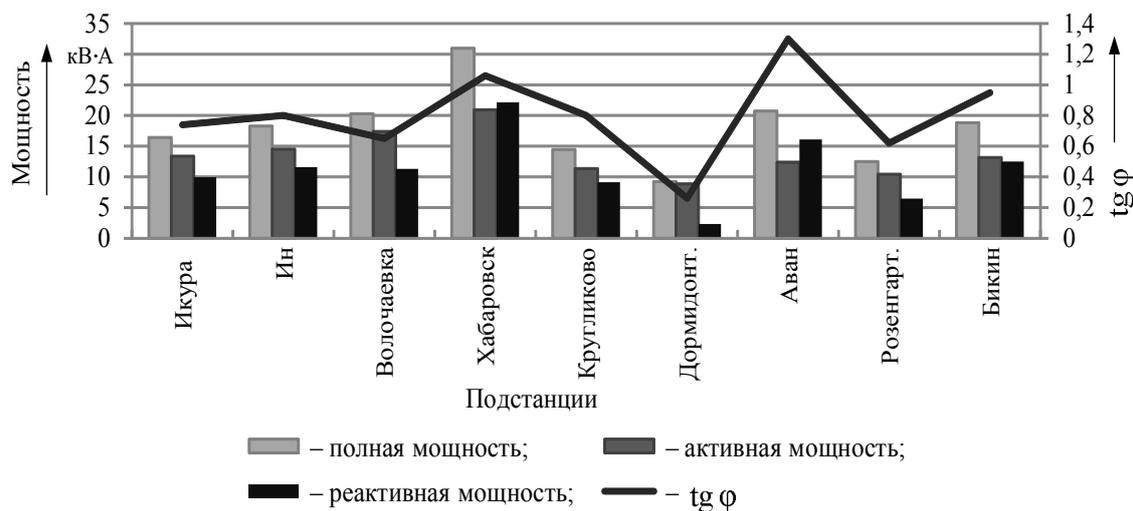


Рисунок 2 – Структура потребления мощности тяговыми подстанциями в 2017 г.

Помимо загрузки трансформатора реактивная мощность влияет на уровень напряжения в контактной сети, увеличивая потери напряжения в линиях электропередач и трансформаторах. На рисунке 3 представлены средние потери напряжения, определенные по данным рисунка 2.

При этом пиковые потери напряжения увеличиваются пропорционально нагрузке, тогда напряжение в контактной сети для некоторых межподстанционных зон может уменьшиться до недопустимых значений.

Увеличение объемов перевозок влечет за собой рост потребности в электрической энергии на железнодорожном транспорте. Кроме того, имеется потребность в электрификации ряда железнодорожных линий, что также потребует изыскания дополнительных мощностей. А с учетом необходимости обеспечения возрастающего промышленного производства [5], территорий опережающего развития (ТОР) и участков земли, распределенных по программе «Дальневосточный гектар», может возникнуть дефицит электрической энергии.

Путем применения компенсации реактивной мощности в тяговой сети можно снизить потребление мощности и тем самым создать резерв в питающей системе для дальнейшего увеличения объемов перевозок.

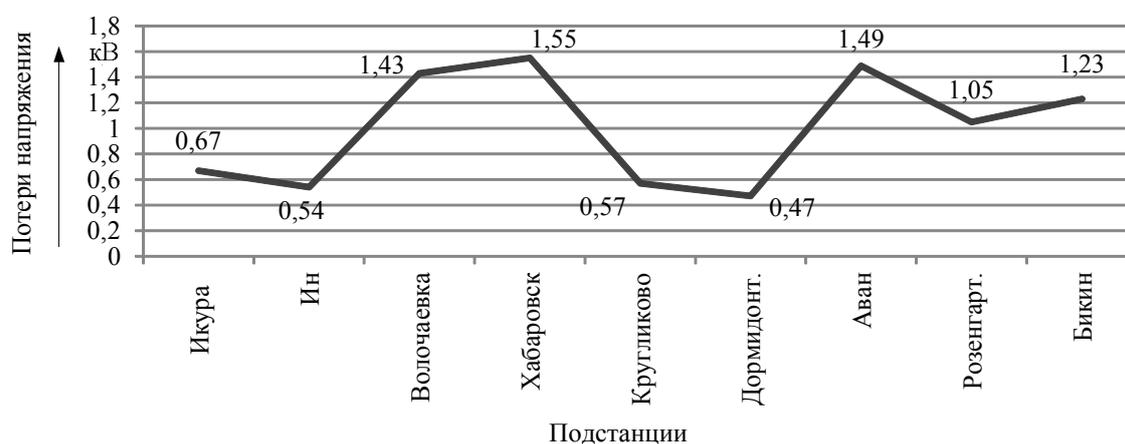


Рисунок 3 – Средние потери напряжения в линиях электропередачи и трансформаторах

Для решения обозначенных выше проблем была разработана методика выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств. Указанная методика включает в себя девять этапов.

На первом этапе производится сбор и систематизация исходных данных для расчета. Собирается информация о схемах внешнего электроснабжения тяговых подстанций, формируются статистические выборки годовых показателей активного и реактивного электропотребления тяговых подстанций, а также статистические выборки характеристик перевозочного процесса для расчетных участков железной дороги. Предлагается использовать среднегодовые значения мощности, так как они учитывают весь диапазон мощностей, потребляемых подстанцией. В статистические выборки характеристик перевозочного процесса входит ряд показателей: грузооборот, количество поездов, средние скорости, масса и длина поездов, густота движения и процент порожних вагонов. Статистические данные рекомендуется собирать по годам или полугодиям. Рекомендуемый объем статистической выборки – от 10 интервалов.

Вторым этапом выполняется прогнозирование электропотребления. Был произведен анализ существующих методик прогнозирования электропотребления, на основании которого рекомендуется осуществлять прогнозирование с помощью корреляционно-регрессионного анализа [6, 7].

На третьем этапе осуществляется расчет режима системы тягового электроснабжения до установки компенсирующего устройства (КУ) и определение величин критериев технической эффективности.

По схемам внешнего электроснабжения составляются расчетные схемы и определяется распределение активных и реактивных мощностей по ветвям составленной схемы. На основе данных о фактическом и перспективном электропотреблении тяговой подстанцией определяются фактические и перспективные величины средних потерь напряжения до расчетной подстанции, средних загрузок каждого тягового трансформатора и загрузки питающих линий электропередачи. На основании полученных данных определяются критерии для оценки технической эффективности применения КУ [8], в том числе:

1) разгрузка силовых трансформаторов. Данный критерий показывает объем резерва мощности, который необходимо получить в трансформаторе при подключении КУ для того, чтобы отсрочить установку дополнительного тягового трансформатора;

2) снижение потерь напряжения до места установки КУ. Расчет можно производить по упрощенной формуле (1) [9]. Для повышения наглядности результатов расчета величину снижения потерь напряжения рекомендуется определять в процентном соотношении от номинального напряжения:

$$\delta U \cong \frac{Q_c \cdot X_\Sigma}{U_n^2} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Q_c – мощность КУ, квар; X_Σ – эквивалентное реактивное сопротивление линий электропередачи и трансформаторов, Ом; U_n – номинальное напряжение сети потребителя (железной дороги), кВ;

3) разгрузка питающих линий электропередачи. Данный критерий показывает, какой резерв мощности имеется в системе внешнего электроснабжения для группы тяговых подстанций.

На четвертом этапе производится описание схемы внешнего электроснабжения. Для этого предлагается использовать теорию графов. При описании схемы принимаем, что узлы электрической схемы, к которым подключены источники или потребители электрической энергии, соответствуют узлам графа, а ветвям графа соответствуют линии электропередачи между ними.

Расчетные графы получают путем декомпозиции электрической сети. Расчетный граф может включать как одну, так и несколько тяговых подстанций. Количество включаемых в граф подстанций определяется схемой их питания: объединение производится при получении питания от одной пары источников электрической энергии.

В дальнейшем расчете составленные графы учитываются весовыми коэффициентами, численно равными коэффициентам токораспределения по ветвям системы внешнего электроснабжения, а также сопротивлениям линий электропередачи, которые имитируются ветвями графов.

Пятым шагом методики является определение мощности и мест установки КУ в тяговой сети. Согласно утвержденной ОАО «РЖД» методике выбор мест установки и мощности КУ осуществляется исходя из уровня напряжения и установка устройств рекомендуется преимущественно на посту секционирования [10, 11]. При необходимости разгрузки тягового трансформатора можно использовать следующую методику.

Определение мест установки осуществляется решением системы уравнений, которая в матричной форме имеет вид [10, 11]:

$$[R_\Sigma] \cdot [Q_{КУ}] = [X], \quad (2)$$

где $[R_\Sigma]$ – матрица, полученная из активных сопротивлений и зависящая только от топологии сети; $[Q_{КУ}]$ – матрица искомых мощностей КУ; $[X]$ – матрица, объединяющая известные коэффициенты A и известные потоки реактивной мощности по элементам сети, определяемые по результатам расчета режима до установки КУ. Коэффициенты A_n объединяют технические и экономические параметры проектируемых КУ и определяются по формуле [10, 11]:

$$A_n = \frac{[(E + a) \cdot K_0 + \Delta P_{уд} \cdot c_0 \cdot T] \cdot U^2}{2 \cdot c_0 \cdot T}, \quad (3)$$

где K_0 – затраты на генерацию 1 квар реактивной мощности; E – норма дисконтирования; $a = a_{экс} + 1/T_{сл}$ – дополнительный коэффициент; $T_{сл}$ – средний срок службы КУ; $a_{экс}$ – амортизационные отчисления на эксплуатационные расходы; $\Delta P_{уд}$ – удельные потери в конденсаторах; c_0 – стоимость электрической энергии; T – время работы КУ, ч/год; U – напряжение в питающей сети.

Так как потребление реактивной энергии осуществляется из системы внешнего электроснабжения и чтобы избежать приведения сопротивлений системы внешнего электроснабжения к другому уровню напряжения, используется напряжение питающей сети.

В результате расчетов по уравнению (2) могут получиться три варианта результатов. Первый вариант – все полученные значения мощностей КУ положительные. Это значит, что

компенсация необходима на всех подстанциях, входящих в расчетный участок. Второй вариант – все полученные значения мощностей КУ отрицательные. В этом случае компенсация на подстанциях не требуется. И третий вариант – часть полученных мощностей КУ положительная, а часть отрицательная. Здесь необходимо повторить расчет по формуле (2), предварительно исключив из всех матриц, входящих в уравнение строки, относящиеся к подстанциям с отрицательными значениями.

Шестой этап заключается в подборе типовых мощностей устройств поперечной компенсации, выпускаемых промышленностью. Установка устройств может осуществляться как в одну, так и в две фазы в зависимости от требуемой мощности и мощности типовых устройств. Установка устройств поперечной компенсации в три фазы не целесообразна по причине минимального технического эффекта при больших капитальных вложениях.

Седьмой этап включает в себя оценку технической эффективности устанавливаемых КУ. Для оценки производится расчет режима работы системы тягового электроснабжения после установки КУ с использованием критериев, определенных в третьем блоке алгоритма.

В случае если выбранные типовые мощности КУ не удовлетворяют заявленным критериям, необходимо изменить выбранную мощность КУ и повторно оценить ее технический эффект. Или принимается решение не устанавливать КУ на рассматриваемой тяговой подстанции.

На восьмом шаге подобранные типовые мощности КУ, удовлетворяющие заданным критериям технической эффективности, проверяются на перспективу увеличения потребляемой мощности тяговыми подстанциями и делается заключение о целесообразности применения КУ выбранной мощности.

Девятый этап посвящен оценке экономической эффективности принятого решения. Данная оценка осуществляется с помощью срока окупаемости КУ и чистого дисконтированного дохода.

Предлагаемая методика выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств позволяет не только определить необходимые параметры компенсирующего устройства, но и оценить перспективность выбранного технического решения на некоторый будущий период.

Расчет по предлагаемой методике для участка Дальневосточной железной дороги показал, что установка КУ необходима на следующих тяговых подстанциях: Хабаровск-II в размере 13,8 Мвар, Кругликово – 4,6 Мвар, Бикин – 3,7 Мвар. При этом обеспечивается возможность работы одного тягового трансформатора до 2030 г. на тяговых подстанциях Кругликово и Бикин, а для тяговой подстанции Хабаровск-II возможность работы одного трансформатора обеспечивается только до 2020 г. При установке КУ снижаются потери напряжения в линиях электропередач и трансформаторах для рассматриваемых подстанций на величину до 3,5 кВ, а нагрузка головных участков линий электропередач уменьшается на величину 10 – 62 %.

Список литературы

1. Ли, В. Н. Особенности выбора компенсирующих устройств в тяговой сети по критериям оптимальности [Текст] / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 38 – 44.
2. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии. Утвержден приказом Минэнерго России от 23 июня 2015 г. – № 380. – М., 2015. – 4 с.
3. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые перегрузки (с Изменением №1). – М.: Стандартинформ, 2009. – 35 с.
4. Дынькин, Б. Е. Оценка эффективности использования трансформаторной мощности тяговых подстанций при увеличении объемов перевозок [Текст] / Б. Е. Дынькин, Е. Ю. Тряпкин // Транспорт: наука, образование, производство: Труды междунар. науч.-практ. конф. [Текст] / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2016. – С. 251 – 254.
5. Васильева, Е. А. Темпы роста промышленности на Дальнем Востоке превышают среднероссийские [Текст] / Е. А. Васильева // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minvr.ru/press-center/news/7747/>

6. Раевский, Н. В. Построение модели прогнозирования тягового электропотребления на основе интервальной регрессии [Текст] / Н. В. Раевский, В. Г. Литвинцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2010. – № 4. – С. 192 – 196.

7. Ли, В. Н. Выбор мощности и мест установки компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения в условиях неопределенности [Текст] / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2015. – № 2 (58). – С. 129 – 132.

8. Ли, В. Н. Методические подходы к определению оптимального потребления электрической энергии из питающей энергосистемы [Текст] / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Электротехника / Всероссийский науч.-исследоват. ин-т кабельной промышленности. – М. – 2016. – № 2. – С. 42 – 44.

9. Грунин, О. М. Электрические сети и системы в примерах и задачах [Текст] / О. М. Грунин, С. А. Филипов / Забайкальский ин-т железнодорожного ж.-д. трансп. – Чита, 2010. – 251 с.

10. СТО РЖД 07.022.1. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика расчета показателей для выбора типа и мощности средств компенсации реактивной мощности. – М., 2015. – 77 с.

11. СТО РЖД 07.022.2. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности – М., 2015. – 51 с.

12. Савина, Н. В. Методика оптимальной компенсации реактивной мощности в сетях распределительных компаний в условиях неопределенности [Текст] / Н. В. Савина, А. А. Казакул // Вестник Ивановского гос. ун-та / Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина. – Иваново. – 2010. – № 3. – С. 42 – 46.

13. Савина, Н. В. Управление эксплуатационными издержками в распределительных сетевых компаниях посредством оптимальной компенсации реактивной мощности [Текст] / Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов, А. А. Казакул // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский национальный исследоват. техн. ун-т. – Иркутск. – 2011. – № 6 (53). – С. 130 – 137.

References

1. Li V. N., Shurova N. K. Considerations compensating devices choice in traction power supply system with using optimally criterion [Osobennosti vibora kompensiruyuschih ustroystv v tyagovoy seti po kriteriam optimalnosti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 3 (27), pp. 38 – 44.

2. Poryadok rascheta znachenii sootnoshenia potrebleniya aktivnoi i reaktivnoi moschnosti dlya otdelnikh kategorii energoprinyimayuschikh ustroystv (grupp energoprinyimayuschikh ustroystv) potrebiteli elektricheskoi energii (The procedure for calculating the ratio of the consumption of active and reactive power for individual power receiving devices (groups of power receiving devices) of consumers of electrical energy, approved by order of the Ministry of Energy of Russia 24.06.2015 №380). Moscow, 2015, 4 pp.

3. *Transformatory siloviye maslyanie obschego nasnacheniya. Dopustimie peregruski. GOST 14209-85* (Transformers power oil general purpose. Allowable overload (with change number 1), State Standart 14209-85). Moscow, Standartinform, 2009, 35 p.

4. Dynkin B. E., Tryapkin E. Yu. Evaluating the effectiveness of traction substation transformer capacity with an increase in the volume of traffic [Ocenka effektivnosti ispolzovaniya transformatornoi moschnosti tyagovikh podstancii pri uvelichenii ob'emov perevozok]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo. Trudi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii* (Transport: science, education, production. Proceedings of the international scientific-practical conference. – Rostov-on-Don, 2016, pp. 251 – 254.

5. Vasileva E. A., The growth rates of industry in the Far East exceed the average Russian [Tempy rosta promishlennosti na Dal'nem Vostoke previshaet srednerossiiskie]. – Access mode: <https://minvr.ru/press-center/news/7747/>.

6. Raevskiy N. V., Litvincev V. G. Traction power consumption forecasting model construction on the basis of interval regress [Postroenie modeli prognozirovaniya tyagovogo elektropotrebleniya na osnove intervalnoi regressii]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2010, no 4, pp. 129 – 196.

7. Li V. N., Shurova N. K. Choice of power and places of installation reactive power compensation in traction power supply in a context of uncertainty [Vibor mest ustanovki I moschnosti kompensiruyuschikh ustroystv v tyagovoi seti v usloviakh neopredelennosti] *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobschenia – Bulletin of the Rostov State University of Communications*, 2015, no. 2, pp. 129 – 132.

8. Li, V. N., Shurova N. K. Methodic approaches to definition of optimal consumption of electric power from electric system [Metodicheskie podkhody k opredeleniyu optimalnogo potrebleniya elektricheskoi energii iz pitayushei energosistemi]. *Elektrotehnika – Electrotechnics journal*, 2016, no.2, pp. 42 – 44.

9. Grunin O. M. Elektricheskie seti v primerakh I zadachakh (Electrical networks and systems in examples and tasks). Chita, 2010, 251 p.

10. STO RZHD 07.022.1 Sistema tyagovogo electrosnabzhenia zheleznoi dorogi peremennogo toka. Metodika rascheta pokazatelei dlya vibora tipa i moschnosti sredstv kompensacii reaktivnoi moschnosti. (Traction power supply system of the AC railway. The method of calculating indicators for selecting the type and power of reactive power compensation means). Moscow, 2015, 77 p.

11. STO RZHD 07.022.21 Sistema tyagovogo electrosnabzhenia zheleznoi dorogi peremennogo toka. Metodika vibora mestrazmeschenia i moschnosti sredstv prodolnoi i poperechnoi kompensacii reaktivnoi moschnosti. (Traction power supply system of the AC railway. Methods for choosing the locations of power placement of means of longitudinal and transverse compensation of reactive power). Moscow, 2015, 51 p.

12. Savina N. V., Kazakul A. A. Method for optimal compensation of reactive power in distribution companies' networks in conditions of uncertainty [Metodika optimalnoi kompensacii reaktivnoi moschnosti v setyakh raspredelitelnykh kompanii v usloviakh neopredelennosti] *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Ivanovo State University*. p. 42 – 46.

13. Savina N. V., Myasoedov Yu. V., Kazakul A. A. Management of operating costs in distribution grid companies through optimal compensation of reactive power [Upravlenie ekspluatatsionnymi izderskami v raspredelitelnykh setevykh kompaniyakh posredstvom optimalnoi kompensacii reaktivnoi moschnosti]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo-gouniversiteta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2011, no. 6, pp. 130 – 137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шурова Наталья Константиновна
Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Рос-
сийская Федерация.
Старший преподаватель кафедры «Системы
электрооборудования», ДВГУПС.
Тел.: +7 (984) 176-97-56.
E-mail: lunor92@mail.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шурова, Н. К. Усиление системы тягового электроснабжения переменного тока применением компенсирующих устройств в условиях пропуска поездов повышенной массы [Текст] / Н. К. Шурова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 106 – 112.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Shurova Natalia Konstantinovna
Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.
Lecturer of the department «Power-supply system»,
FESTU.
Phone: +7 (984) 176-97-56.
E-mail: lunor92@mail.ru.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Li V.N., Shurova N.K. Strengthening the traction power supply system of accurrent by the application of compensating devices in the conditions of increased mass train handling, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 106 – 112. (In Russian).

Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, А. В. Александров

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ТЯГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Аннотация. Анализ качества электрической энергии с точностью, определяемой современными стандартами, требует применения цифровой обработки сигналов. При измерении одной из основных операций является нахождение корреляции сигналов. Выполнение операций над цифровыми представлениями сигналов, содержащих большое число отчетов, требует значительных вычислительных ресурсов, что приводит к важности проблемы быстрого вычисления корреляции.

Известные способы вычисления корреляции предполагают использование ряда алгоритмов: преобразование корреляции в циклическую свертку, вычисление циклической свертки через БПФ и др. По отдельности эти алгоритмы хорошо изучены, однако при совместном их использовании возможна дополнительная оптимизация алгоритмов.

В статье предлагается способ оптимизации вычислительной процедуры для нахождения корреляции сигналов, связанной с сокращением операций при выполнении подряд двух преобразований Фурье. Сокращение операций по перестановке данных производится за счет другого способа размещения результатов вычислений. В зависимости от вычислительной архитектуры предложенный способ позволяет ускорить вычисления до 20 – 25 %.

Ключевые слова: качество электроэнергии, корреляция, быстрое преобразование Фурье, вычислительная схема, алгоритм Pease FFT.

Evgenii A. Altman, Dmitrii A. Elizarov, Aleksandr V. Aleksandrov

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

IMPROVEMENT OF COMPUTING PROCEDURES OF THE SIGNALS ANALYSIS IN THE TRACTION ELECTRICAL NETWORK

Abstract. The analysis of electric energy quality with a required by modern standards accuracy demands applying of digital signals processing. At measurement, one of the main operations is finding signals correlation. Operations performance over digital representations of the signals containing a large points number requires many of computing resources that results in importance of a fast correlation calculation problem.

The well-known methods of correlation calculation is applying a range of algorithms: transformation correlation to cyclic convolution, calculation cyclic convolution through FFT and others. These algorithms are well-studied, however their combination make possible additional optimization of algorithms.

In paper we offer the method of computing procedure optimization for signals correlation calculation based on operations reduction when performing a sequence two Fourier transformations. Using another way of placing the calculations results we can reduce a data rearranging operations number. Depending on computing architecture, the offered method allows to accelerate calculations to 20 – 25%.

Keywords: quality of the electric power, correlation, fast transformation of Fourier, computing scheme, algorithm Pease FFT.

Задача повышения качества электрической энергии не может быть решена без эффективных средств для анализа сигналов и процессов, происходящих в электрических сетях. Точность измерений, регламентируемая современными стандартами, может быть достигнута только с использованием средств цифровой обработки сигналов [1].

Одним из основных инструментов цифровой обработки сигналов, применяемых для анализа процессов в электрических сетях, является функция корреляции, которая позволяет производить сравнение измеренных сигналов с эталонными. В связи с этим совершенствование программ для вычисления корреляции является важной частью создания приборов для измерения параметров качества электрической энергии. В частности, с помощью корреляции с вы-

сокой точностью находятся параметры гармоник сигналов и определяются возможные негативные влияния на качество электрической энергии подключенных к ней мощных приборов.

Требования к точности современных измерительных приборов определяют необходимость в анализе оцифрованных сигналов электрической сети, содержащих большое число отчетов. Для анализа таких сигналов требуется использование быстрых алгоритмов.

Быстрыми алгоритмами цифровой обработки сигналов называют алгоритмы, которые позволяют найти результат вычислений по математической формуле за меньше число вычислительных операций, чем требуется для нахождения этого результата непосредственно по формуле. Они позволяют сократить требуемое число операций во много раз и, тем самым, сделать возможным выполнение требуемых операций над сигналами за допустимый период времени или в режиме реального времени.

Применительно к описанным условиям основным способом для быстрого нахождения корреляции сигналов является сведение корреляции к вычислению циклической свертки, которая в свою очередь вычисляется через быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Все этапы вычислений этого способа являются хорошо изученными алгоритмами. Однако комбинации этих алгоритмов открывают новые возможности для дополнительной оптимизации. В статье рассматривается способ подобной оптимизации, связанный с сокращением числа операций на перестановку данных в алгоритмах БПФ. Хотя эти операции не являются вычислительными и не учитываются при расчете основных метрик алгоритмов, тем не менее, они оказывают заметное влияние на быстродействие их практических реализаций [2].

Расчет корреляции через БПФ состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью простой перестановки порядка действий процесс вычисления корреляции сначала преобразуется в линейную свертку, которая затем преобразуется в циклическую. На втором этапе сигналы, с которыми требуется выполнить циклическую свертку, с помощью БПФ переводятся в частотную область, в которой быстро выполняется циклическая свертка.

Для реализации первого этапа существует несколько алгоритмов: перекрытие с добавлением (overlap-add method), перекрытие с сохранением (overlap-save method) и др. [3]. Основная идея этих методов заключается в разделении большего из входных сигналов на части, примерно равные меньшему из входных сигналов, и в дополнении полученных частей большего сигнала и меньшего сигнала нулями так, чтобы формула для вычисления соответствующих отчетов линейной свертки совпала с формулой для части отчетов соответствующей циклической свертки. Более детальное описание этих методов в статье приводить не будем, поскольку представляемые в ней результаты относятся ко второму этапу вычисления корреляции.

Рассмотрим подробнее алгоритм быстрого вычисления циклической свертки. Для его краткого и удобного математического описания будем рассматривать входные и выходные сигналы как числовые последовательности. Условимся обозначать последовательности заглавными латинскими буквами, а элементы этих последовательностей – соответствующими строчными. Количество элементов в последовательности будем обозначать заглавными латинскими буквами, а индексы – строчными. Например, последовательность X содержит N элементов от x_0 до x_{n-1} .

Циклической сверткой Z последовательностей X и Y будем называть последовательность, рассчитываемую по следующей формуле (операции с индексами выполняются по модулю N):

$$z_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * y_{m-n}. \quad (1)$$

Обозначим дискретное преобразование Фурье (ДПФ) последовательности X как $DFT(x)$:

$$DFT(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{nm}, \quad (2)$$

где $W_N^{nm} = e^{-j2\pi \frac{nm}{N}}$ – поворачивающие множители.

Рассмотрим ДПФ от последовательности Z :

$$DFT(x) = \sum_{l=0}^{N-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} x_n * y_{l-n} \right) W_N^{lm}, \quad (3)$$

Поменяем местами порядок суммирования:

$$DFT(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * \sum_{l=0}^{N-1} y_{l-n} W_N^{lm}. \quad (4)$$

Представим поворачивающий множитель в следующем виде: $W_N^{lm} = W_N^{(l-n)m} * W_N^{nm}$. Значение W_N^{nm} можно вынести за знак внутренней суммы, а вместе с $W_N^{(l-n)m}$ внутренняя сумма соответствует определению ДПФ последовательности Y (которое можно вынести за знак внешней суммы):

$$DFT(x) = DFT(y) * \sum_{n=0}^{N-1} x_n * W_N^{nm}. \quad (5)$$

Оставшаяся сумма представляет собой ДПФ от последовательности X :

$$DFT(Z) = DFT(Y) * DFT(X). \quad (6)$$

Таким образом, ДПФ от циклической свертки двух сигналов будет равно произведению ДПФ этих сигналов. Используя это свойство, циклическую свертку можно найти по следующей схеме:

- 1) вычисляем БПФ входных последовательностей;
- 2) перемножив результаты БПФ, получаем ДПФ выходной последовательности (результат циклической свертки);
- 3) с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) находим циклическую свертку.

Наибольшую сложность в этом методе имеют первый и третий этапы – $O(N \log_2 N)$, где N – количество элементов в последовательностях (на первом этапе вычисления корреляции создаются входные последовательности одинаковой длины). На обоих этих этапах используется алгоритм БПФ. При вычислении корреляции идет вычисление пары БПФ – результаты прямого БПФ подаются на входы ОБПФ. Рассмотрим операции этой пары БПФ как единую вычислительную схему.

При выполнении одного из классических алгоритмов БПФ (например, Кули – Тьюки) данные на выходе будут расположены не по порядку. Для большинства алгоритмов данные будут располагаться в так называемом битреверсном порядке. Для получения корректного порядка данных требуется выполнение дополнительных операций по перестановке данных. Существуют также алгоритмы, в которых перестановки выполняются до начала вычислительных операций. Предложены алгоритмы, в которых перестановки выполняются в ходе вычислений, но в общем случае, если требуется прямой порядок элементов, на выходе перестановок не избежать.

Битреверсная перестановка отнимает много процессорного времени, для некоторых процессорных архитектур до четверти от времени вычислительных операций [7]. Существуют алгоритмы ее выполнения, позволяющие сократить число требуемых операций за счет использования дополнительной памяти [5 – 7], однако они не убирают полностью связанные с перестановкой потери.

Одним из подходов в борьбе с потерями на битреверсных перестановках является построение вычислительных схем, в которых перестановки выполняются по ходу выполнения вычислительных операций [8, 9]. Такие вычислительные схемы не являются универсальным решением проблемы перестановок, поскольку перестановки требуется выполнять совместно

с вычислительными операциями и не для всех процессорных архитектур их можно скрыть, выполняя параллельно вычислительным операциям.

Для частного случая применения БПФ для вычисления корреляции можно решить проблему битреверсных перестановок, используя следующий способ. При вычислении корреляции, когда результаты БПФ подаются на входы ОБПФ, можно избежать стадий перестановки. Для этого нужно подобрать для прямого БПФ алгоритм, который требует битреверсную перестановку после вычислений, а для ОБПФ – алгоритм, который требует битреверсную перестановку перед вычислениями. Эта перестановка, будучи выполненной два раза подряд, возвращает данные на исходные позиции, поэтому в рассматриваемом случае результат выполнения пары БПФ не изменится, если убрать две битреверсные перестановки [10].

Другой подход повышения быстродействия БПФ, связанный с оптимизацией операций пересылки данных, называется алгоритмом Pease FFT и предложен Пизом (Marshall Pease) в работе [11]. Он предлагался как альтернатива алгоритму Кули – Тьюки для параллельных (векторных) вычислений. В оригинальной работе алгоритм был описан в терминах матричной алгебры, его представление в виде графа рассмотрено в работе [12].

Вычислительная схема алгоритма Pease FFT для восьми точек с прореживанием по частоте приведена на рисунке 1.

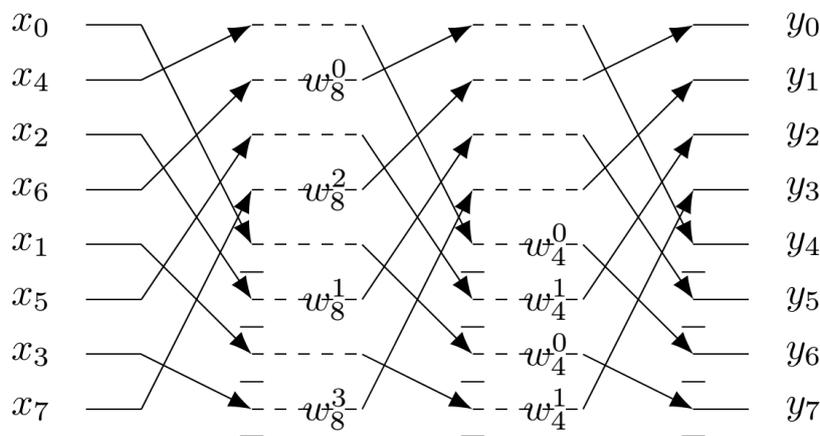


Рисунок 1 – Алгоритм Pease FFT для FFT-8 с прореживанием по частоте

Перекрещенными стрелочками на рисунке 1 обозначена так называемая операция «бабочка». У этой операции есть два входа (x_0 , x_1) и два выхода (y_0 , y_1), связанные между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} y_0 &= x_0 + x_1; \\ y_1 &= x_0 - x_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Выходы одних «бабочек» передаются на входы других, в некоторых случаях результаты бабочек требуется умножить на поворачивающие множители.

Как видно из рисунка 1, на всех стадиях вычисляются одинаковые «бабочки». Индексы элементов «бабочек» не требуют вычислений: входные данные считываются по порядку, результаты «бабочек» записываются в две половины массива – верхний выход «бабочки» в верхнюю половину, нижний – в нижнюю. Поворачивающие множители расположены равномерно. Все это делает алгоритм Pease FFT особенно удобным для организации параллельных вычислений, но и в случае одноядерных процессоров позволяет получить более быструю реализацию.

Алгоритм Pease FFT может быть реализован и с помощью прореживания по времени (рисунок 2).

В отличие от классических алгоритмов типа Кули – Тьюки для алгоритма Pease FFT отличие схем с прореживанием по времени и по частоте сводится к различной расстановке поворачивающих множителей. Независимо от схемы прореживания этот алгоритм требует выполнения битреверсной перестановки перед вычислительными операциями.

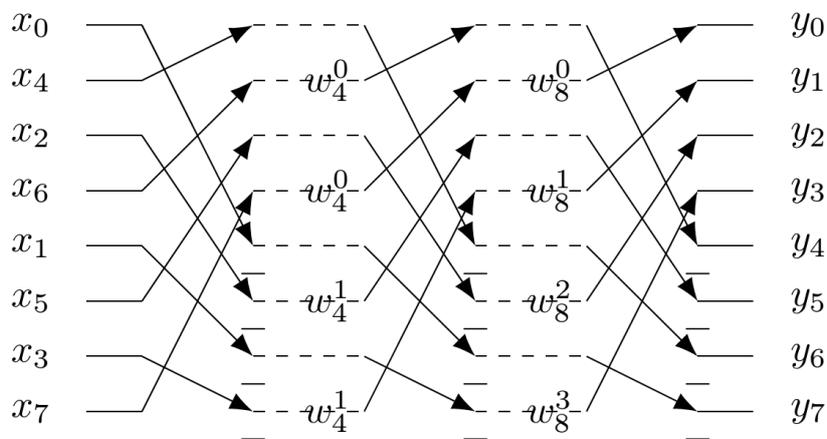


Рисунок 2 – Алгоритм Pease FFT для FFT-8 с прореживанием по времени

Рассмотренные два способа повышения быстродействия БПФ (устранение перестановки при вычислении корреляции и алгоритм Pease FFT) не могут работать совместно, поскольку ни в одном из вариантов Pease FFT нет схемы вычислений, при которой битреверсная перестановка выполнялась бы после вычислительных операций.

Для построения быстродействующего алгоритма вычисления корреляции, в котором отсутствовала бы битреверсная перестановка и вместе с тем использовалась бы оптимальная схема расположения данных, аналогичная алгоритму Pease FFT, предлагается использовать вычислительную схему с повторением стадий, предложенную в работе [13] для оптимизации алгоритма БПФ.

В этой работе было показано, что вычислительная схема с повторением стадий обладает свойствами, аналогичными свойствам Pease FFT. При практической реализации она обеспечивала выигрыш в производительности до 20 % по сравнению с классическими схемами алгоритма Кули – Тьюки. Отличительной особенностью этой схемы, позволяющей использовать ее для решения задачи вычисления корреляции, является расположение данных. На входе этой схемы данные располагаются в прямом порядке, на выходе – в битреверсном. Пример схемы для FFT-8 с прореживанием по времени приведен на рисунке 3.

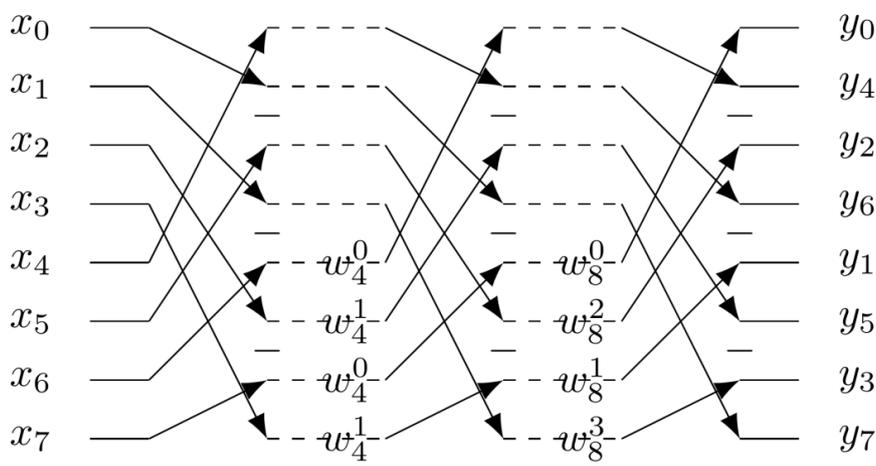


Рисунок 3 – Вычислительная схема с повторением стадий для FFT-8 с прореживанием по времени

Как и в случае алгоритма Pease FFT реализации этой вычислительной схемы возможны с прореживанием как по времени, так и по частоте. В обоих случаях будет использоваться одинаковый набор «бабочек», а отличие будет заключаться в расстановке поворачивающих множителей. На рисунке 4 приведена вычислительная схема с повторением стадий для FFT-8 с прореживанием по частоте.

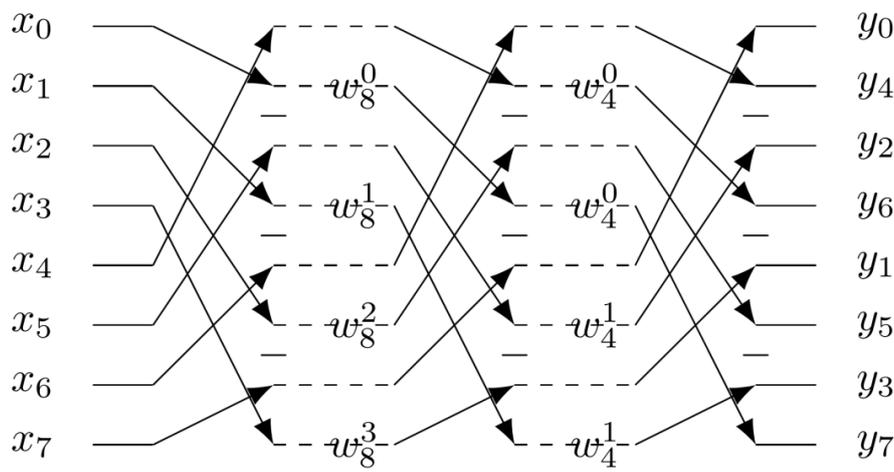


Рисунок 4 – Вычислительная схема с повторением стадий для FFT-8 с прореживанием по частоте

Таким образом, мы получаем следующую схему вычисления корреляции сигналов:

- 1) вычисляем БПФ входных последовательностей по вычислительной схеме с повторением стадий;
- 2) перемножаем расположенные в битреверсном порядке результаты БПФ и получаем ДПФ циклической свертки в таком же порядке;
- 3) выполняем ОБПФ по схеме Pease FFT.

Предлагаемая схема вычислений позволяет получить более быстрые программы для вычисления корреляции при большом числе отсчетов во входных сигналах. Выигрыш в быстродействии значительно зависит от архитектуры вычислительного устройства. Он может достигать 20 – 25 % как по сравнению с алгоритмами, реализующими вычисление корреляции без битреверсной перестановки обычным образом, так и по сравнению с алгоритмами, реализующими вычисление корреляции с помощью оптимизированных с использованием алгоритма Pease FFT БПФ.

За счет применения описанной методики повышается скорость, а следовательно, и точность измерения параметров тока и напряжения в контактной сети, значений мощности, построения спектральных характеристик. Отпадает необходимость использования технических приборов и устройств, имеющих в своем составе специализированные процессоры для обработки цифровых сигналов.

Список литературы

1. Альтман, Е. А. Повышение точности оценки параметров сигналов в электрической сети в системе тягового электроснабжения [Текст] / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – №. 3 (11). – С. 95 – 100.
2. Альтман, Е. А. Моделирование алгоритмов обработки сигналов с целью оптимизации их аппаратной реализации [Текст] / Е. А. Альтман, Т. В. Васеева, Д. И. Кузнецов // Современные научные исследования и разработки / Научный центр «Олимп». – М. – 2017. – №. 4. – С. 27 – 29.
3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
4. Johnson S. G. Frigo M. Implementing FFTs in Practice. Houston: Rice University Publ., 2008, 23 p.

5. Elster A. C. Fast bit-reversal algorithms, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989. pp. 1099 – 1102.
6. Evans D. M. A second improved digit-reversal permutation algorithm for fast transforms, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, no.37 (8), pp. 1288 – 1291.
7. Rius J. M., De Porrata-Doria R. New FFT bit-reversal algorithm, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1995, no. 43 (4), pp. 991 – 994.
8. Cochran W. T., Favon D. L., Helms H. D., Kaenel R. A. What is the fast Fourier transform?, *Proceedings of the IEEE*, 1967, no. 55 (10), pp. 1664 – 1674.
9. Johnson H., Burrus C. An in-order, in-place radix-2 FFT, *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1984, no 9, pp. 473 – 476.
10. Альтман, Е. А. Повышение эффективности метода перекрытия с накоплением для вычисления дискретной свертки [Текст] / Е. А. Альтман, С. С. Грицутенко // Вопросы радиоэлектроники / ЦНИИ Электроника. – М. – 2010. – Т. 1. – №. 3. – С. 88 – 96.
11. Pease M. C. An adaptation of the fast Fourier transform for parallel processing, *Journal of the ACM (JACM)*, 1968, no. 15 (2), pp. 252 – 264.
12. Swartztrauber P. N. FFT algorithms for vector computers, *Parallel Computing*, 1984, no 1, pp. 45 – 63.
13. Альтман, Е. А. Оптимизация вычислительной схемы быстрого преобразования Фурье [Текст] / Е. А. Альтман // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2008. – № 1 (64). – С. 149 – 151.

References

1. Al'tman E. A., Elizarov D. A. Increase in accuracy of assessment signal parameters in an electrical network in the traction power supply system [Povy'shenie tochnosti ocenki parametrov signalov v e'lektricheskoy seti v sisteme tyagovogo e'lektrosnabzheniya]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 3 (11), pp. 95 – 100.
2. Al'tman E. A., Vaseeva T. V., Kuznecov D. I. Modeling signal processing algorithms for the purpose of their hardware realization optimization [Modelirovanie algoritmov obrabotki signalov s cel'yu optimizacii ix apparatnoj realizacii]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki*, 2017, no. 4, pp. 27 – 29.
3. Sergienko A. Cifrovaya obrabotka signalov (Digital signal processing). Sankt-Peterburg: BXV-Peterburg, 2011, 768 p.
4. Johnson S. G. Frigo M. Implementing FFTs in Practice. Houston: Rice University Publ., 2008, 23 p.
5. Elster A. C. Fast bit-reversal algorithms, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989. pp. 1099 – 1102.
6. Evans D. M. A second improved digit-reversal permutation algorithm for fast transforms, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, no.37 (8), pp. 1288 – 1291.
7. Rius J. M., De Porrata-Doria R. New FFT bit-reversal algorithm, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1995, no. 43 (4), pp. 991 – 994.
8. Cochran W. T., Favon D. L., Helms H. D., Kaenel R. A. What is the fast Fourier transform?, *Proceedings of the IEEE*, 1967, no. 55 (10), pp. 1664 – 1674.
9. Johnson H., Burrus C. An in-order, in-place radix-2 FFT, *IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1984, no 9, pp. 473 – 476.
10. Al'tman E. A., Griczutenko S. S. Increase in efficiency of a overlapping method with accumulation for calculation of discrete convolution [Povy'shenie e'ffektivnosti metoda perekry'tiya s nakopleniem dlya vy'chisleniya diskretnoj svertki]. *Voprosy radioe'lektroniki*, 2010, no. 3, pp. 88 – 96.
11. Pease M. C. An adaptation of the fast Fourier transform for parallel processing. *Journal of the ACM (JACM)*, 1968, vol. 15, no. 2, pp. 252 – 264.
12. Swartztrauber P. N. FFT algorithms for vector computers. *Parallel Computing*, 1984, vol. 1, no. 1, pp. 45 – 63.

13. Al'tman E. A. [Optimizaciya vy`chislitel'noj sxemy` by`strogo preobrazovaniya Fur'e]. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2008, no. 1 (64), pp. 149 – 151.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Альтман Евгений Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: altmanea@gmail.com

Елизаров Дмитрий Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: elizarovda@gmail.com

Александров Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: alexandrov_a_v@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Альтман, Е. А. Совершенствование вычислительных процедур анализа сигналов тяговой электрической сети [Текст] / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, А. В. Александров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 113 – 120.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Al'tman Evgenii Anatolyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: altmanea@gmail.com

Elizarov Dmitrii Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: elizarovda@gmail.com

Aleksandrov Aleksandr Vadimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department « Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: alexandrov_a_v@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Altman E. A., Elizarov D. A., Aleksandrov A. V. Improvement of computing procedures of the signals analysis in the traction electrical network. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 113 – 120 (In Russian).

УДК 621.317:004.7

А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин, Т. В. Васеева

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. Рассматриваются пути повышения эффективности информационно-измерительного комплекса автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии. Исследуется возможность уменьшения объема телеметрического трафика в каналах передачи информации и повышения энергетической эффективности информационно-измерительной аппаратуры.

Ключевые слова: автоматизация, информационная система, мониторинг, учет, измерение, электроэнергия, передача данных, алгоритм.

Andrey A. Lavrukhin, Andrey G. Malyutin, Tatiana V. Vaseeva
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INFORMATION-MEASURING COMPLEX OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING AND METERING OF ELECTRICITY

Abstract. We consider the ways of increasing the effectiveness of the information-measuring complex of an automated system for monitoring and metering electricity. The possibility of reducing the volume of telemetry traffic in information transmission channels and increasing the energy efficiency of information-measuring equipment is investigated.

Keywords: automation, information system, monitoring, accounting, measurement, electric power, data transfer, algorithm.

К основным факторам, сдерживающим развитие распределенных информационно-измерительных систем (ИИС), относятся ограниченная пропускная способность каналов передачи информации и проблемы, связанные с энергетической эффективностью информационно-измерительной аппаратуры [1 – 3]. В статье рассматриваются пути решения данных проблем в автоматизированной системе мониторинга и учета электроэнергии (АСМУЭ, далее – система) [2, 4].

Первая проблема является ключевой в задачах межмашинного взаимодействия (Machine-to-Machine, M2M) в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) и системах ИИТ (Industrial Internet of Things) с развитой распределенной сетевой инфраструктурой и усугубляется с ростом объема передаваемой информации. Часто для уже имеющихся каналов проблема решается путем повышения эффективности протоколов передачи данных и оптимизации трафика, передающегося от датчиков или каких-либо других терминальных устройств к централизованным системам сбора информации. Это относится как к беспроводным, так и к проводным каналам, реализованным на основе современных технологий и протоколов передачи данных: ZigBee, Z-Wave, IO-Link, PROFINET, CAN, DeviceNet, Industrial Ethernet и др.

Решение второй задачи, связанной с повышением энергетической эффективности информационно-измерительной аппаратуры, непосредственно зависит от уровня развития элементной базы, а также от того, какой функциональный состав должен быть реализован в рамках всей системы. Частично проблема может быть решена за счет модернизации аппаратного обеспечения, что является длительной и затратной процедурой. Более эффективный путь решения проблемы – применение или разработка новых методов обработки, сжатия и восстановления информации и соответствующая модернизация программного обеспечения.

Проблема экономного использования ресурсов каналов передачи данных должна решаться с учетом выполнения одновременно требований надежности, экономичности, масштабируемости и конфигурируемости. Применяемые при построении системы решения должны отвечать требованиям информационной безопасности и иметь запас для расширения функциональности системы и ее перспективного развития.

В большинстве случаев рассматриваемые автоматизированные системы имеют иерархическую структуру [1 – 3]: нижний уровень исполнительных и измерительных устройств, промежуточный уровень распределения и подсистемы верхнего уровня, а также конечные потребители информации (пользователи). Соответственно на этих уровнях решаются следующие основные функциональные задачи: сбор информации с источников данных (измерителей), промежуточная обработка и хранение информации, централизованное хранение и предоставление информации конечным пользователям системы.

Нижний уровень АСМУЭ состоит из отдельных измерительных устройств (информационно-измерительные комплексы – ИИК) и исполнительных механизмов [4, 5]. Промежуточный уровень (локальные информационно-вычислительные комплексы – ЛИВК) представлен технологическими контроллерами или промышленными компьютерами, осуществляющими сбор данных с датчиков (или передачу управляющих воздействий на исполнительные устройства), управление в режиме реального времени на локальных участках объекта автоматизации и временную синхронизацию всех устройств системы. На вершине иерархии находятся автоматизированные рабочие места, операторные станции, серверы различных служб и сервисы (информационно-вычислительный комплекс – ИВК), задачи которых – выполнение интеграции в рамках всей системы, централизованный сбор и комплексный анализ данных, изменение режимов работы системы как целого.

Средства сбора данных и исполнительные устройства подключаются к промежуточной подсистеме с использованием технологий локальных сетей, ориентированных на промышленную эксплуатацию (Industrial Ethernet, ZigBee и др.), либо, в особых случаях, беспроводных технологий глобальных сетей операторов связи (например, GSM, GSM-R, UMTS, LTE и др.). Для передачи информации между подсистемами верхнего уровня и устройствами промежуточного уровня распределения могут быть задействованы глобальные или корпоративные сети, которые могут взаимно резервировать друг друга. Особенностью взаимодействия уровня ИВК с конечными потребителями информации является применение стандартных интернет / интранет-ориентированных технологий, средств и протоколов обмена данными с использованием универсального web-клиента – браузера, что позволяет реализовать клиентскую часть на различных программно-аппаратных платформах. Такая архитектура имеет высокую степень масштабируемости, устойчивости, доступности, универсальности и унификации. Последние характеристики расширяются с применением сервис-ориентированной архитектуры (SOA, service-oriented architecture), основанной на использовании сервисов (служб) со стандартизированными интерфейсами, например, на базе языка XML.

Во всех случаях необходимо обеспечивать работу в реальном масштабе времени всей транспортной инфраструктуры, гарантированный прозрачный доступ к информации по схеме 24/7/365, единообразию протоколов передачи данных, малое время отклика, адекватную пропускную способность, отсутствие «узких мест», изоляцию трафика без дополнительных задержек.

Транспортная инфраструктура должна обеспечивать следующие базовые функции:

- передачу информационных и диагностических сообщений на более высокий уровень;
- получение управляющей информации с более высокого уровня или их транзит с более высокого уровня на более низкий уровень;
- обнаружение ошибок в сообщениях и отбрасывание искаженных сообщений;
- повторную установку соединения и повторную передачу сообщений;
- функции защиты информации, включая управление ключами шифрования;
- управление качеством обслуживания.

Можно определить комплекс мер по повышению пропускной способности транспортной инфраструктуры:

- использование резервных каналов в качестве основных;
- использование обходных каналов передачи данных;
- добавление линий передачи данных. Данная мера может быть использована на каналах связи, имеющих наибольшую загрузку;
- повышение пропускной способности каналов за счет перехода на более производительные технологии, например, плотного спектрального уплотнения (DWDM) на магистральных линиях связи;

- мониторинг и классификация потоков трафика с целью выявления нецелесообразного расходования пропускной способности. Использование протоколов, предназначенных для учета сетевого трафика (например, Net-Flow);
- разделение передачи важного и второстепенного трафика по времени;
- оптимизация низкоуровневых и прикладных протоколов передачи телеметрических данных.

Для внутрисистемного информационного обмена необходимо использование открытых стандартных протоколов, обеспечивающих

- функциональную полноту и корректность реализации функций;
- совместимость систем и аппаратуры различных поставщиков;
- возможность объективного тестирования реализации протокола.

Основой для построения транспортных коммуникаций удаленных элементов системы являются модель взаимодействия открытых систем OSI/ISO и стек протоколов TCP/IP, что является стандартным, межплатформенным, низкоуровневым сервисом для обмена данными. Примером применения стека TCP/IP является ведомственная корпоративная сеть передачи данных (КСПД, сеть масштаба предприятия) ОАО «РЖД», которая в общем случае реализует транспортные услуги для поддержки территориально распределенных бизнес-приложений.

Использование стека протоколов TCP/IP на всех уровнях системы возможно также благодаря следующим преимуществам:

- массовость (стек реализован в большинстве сетевых устройств);
- заложенная в самом протоколе иерархичность;
- возможность одновременного функционирования на одном устройстве нескольких сетевых процессов;
- унификация доступа к устройствам и простота администрирования (система администрируется на уровне самих сервисов);
- простота реконфигурирования, масштабирования с сохранением целостности системы (соответствие структуре «доступ – распределение – ядро»).

Таким образом, стек TCP/IP целесообразно использовать в качестве базового стека протоколов для обмена информацией между элементами системы (с поддержкой прикладных протоколов, например, FTP и HTTP). При этом все элементы системы имеют сетевой компонент операционных систем, основанный на интерфейсе сокетов, которые обеспечивают примитивы низкого уровня для непосредственного обмена потоком байтов между программными процессами. Концепция взаимодействия программных компонентов – асинхронный обмен сообщениями с использованием очередей сообщений.

Для передачи периодической информации или информации о событиях по основному и резервному каналам могут быть использованы протоколы электронной почты SMTP и POP3. Результаты измерений на третьем уровне передаются в виде электронного документа, сформированного посредством расширяемого языка разметки (Extensible Markup Language – XML) или JSON, а между 1-м и 2-м уровнями – в формате JSON или CSV [5].

Однако использование стека TCP/IP на нижнем уровне исполнительных и измерительных устройств и промежуточный уровень распределения приводят к увеличению накладных расходов на транспортировку телеметрических данных. Это в первую очередь связано с избыточностью заголовков сообщений и сложностью функционирования протоколов передачи.

Следует отметить, что реализация и оптимизация IP-сервисов в системе должны выполняться в следующих основных направлениях:

- выявление критериев для оптимизации и создание имитационной модели IP-сети, адаптированной под требования системы;
- анализ и корректировка таких характеристик, как, например, задержка данных, особенно в поточном режиме работы (real-time);

разработка правил (методик) тонкой настройки сервисов, учитывающих специфику системы (предэксплуатационная наладка системы);

анализ и возможность реконфигурации нагрузки сети, в том числе автоматическое управление трафиком;

рассмотрение возможности использования каналов системы не только для передачи измерений.

Таким образом, для унификации применяемых стеков на разных уровнях системы и минимизации объема передаваемой информации необходимо реализовать протокол передачи данных телеметрической информации, поддерживающий асинхронный характер взаимодействия, компактные сообщения, возможность масштабирования и гибкую систему команд [5].

Предлагаемый в работе протокол передачи данных телеметрической информации обеспечивает взаимодействие уровней системы путем обмена сообщениями, типовая структура которых приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Структура сообщения

Поля сообщения	Примечание
Преамбула (4 байта)	Битовая последовательность 1000100100000111000....
Длина тела сообщения (4 байта)	Размер сообщения в байтах
Тип сообщения (4 байта)	00x00ddppss dd (direction) – признак направления; pp (operation) – поле операции; ss (subject) – поле субъекта операции (источника или получателя)
Номер сообщения (4 байта)	Используется, если сообщение является частью цепочки связанных по смыслу сообщений
Тело сообщения в формате CSV (или JSON). Содержит временные метки	01.02.2015 00:01:42;3.582;407;1458.185;2541484.729;138807.445 01.02.2015 00:01:45;3.599;403;1451.529;2541485.939;138807.445 01.02.2015 00:01:48;3.603;402;1449.717;2541487.147;138807.445 01.02.2015 00:01:51;3.574;387;1384.051;2541488.300;138807.445 01.02.2015 00:01:54;3.594;389;1399.135;2541489.466;138807.445 01.02.2015 00:01:57;3.599;389;1399.125;2541489.466;138807.445

Протокол реализуется службой сбора данных телеметрии, которая является сетевой и предназначена для удаленного взаимодействия с большим количеством ИИК и концентраторами, она реализована по многопоточному и асинхронному принципам. Многопоточность позволяет достичь более эффективного использования ресурсов вычислительной машины за счет параллельного или псевдопараллельного исполнения несвязанных программных задач. Асинхронность необходима для действий, которые потенциально являются блокирующими, например, когда приложение работает в сети. Например, взаимодействие сервиса и некоторого ИИК иногда осуществляется медленно или с задержкой. Если такое действие блокируется сервисом в пределах синхронного процесса, все сеансы связи с другими ИИК вынужденно переходят в состояние ожидания. В случае асинхронного процесса независимо от завершения блокирующей задачи сервис может перейти к следующей операции, а потом вернуться к исходной задаче.

Рассмотренный протокол передачи технологической информации обеспечивает весь необходимый спектр коммуникационных и сервисных задач, необходимых для полноценного взаимодействия всех уровней системы и поддержания ее работоспособности и целостности в различных режимах функционирования системы. Протокол отвечает требованиям по асинхронности взаимодействия, минимальному размеру сообщений и обеспечивает масштабирование и гибкую систему команд.

В ряде случаев, когда возможности каналов передачи данных могут непредсказуемо меняться в зависимости от различных внешних факторов, на уровне ИИК целесообразно

применять алгоритмы обработки данных и протоколы их передачи, обеспечивающие адаптивное ограничение трафика. Такой подход предусматривает установление нижней границы трафика данных, при котором передается необходимый минимум информации, и возможность увеличения трафика, если необходимо передавать некоторые детализированные данные.

Реализацию предлагаемого подхода удобно рассмотреть на примере распределенных автоматизированных систем мониторинга и учета электроэнергии в сетях высоковольтного напряжения, в том числе применяемых на железной дороге (в системе тягового электропитания) [2 – 4]. Основным элементом ИИК является счетчик электроэнергии – микропроцессорное устройство, к которому предъявляется комплекс требований, начиная от экономного энергопотребления, заканчивая реализацией в нем ряда функций, связанных с преобразованием, надежным хранением, обработкой и передачей информации [6]. Требование к пониженному энергопотреблению связано в первую очередь с тем, что питание для счетчика получается непосредственно от измеряемого напряжения 3,3 кВ с использованием специализированного преобразователя высоковольтного напряжения в стабилизированное низковольтное напряжение. Такой подход позволяет отказаться от элементов, требующих реализации гальванической изоляции с высоким уровнем электрической прочности, избежать проблем, связанных с паразитной емкостью между входом и выходом блока питания, снизить массу и стоимость измерителя, а также получить дополнительные преимущества в скорости монтажа и развертывания системы [7].

Состав основных функций программного приложения счетчика электроэнергии постоянного тока включает в себя следующее [8]:

- измерение значений сигналов тока и напряжения с частотой дискретизации 16 кГц;
- вычисление усредненных на заданных интервалах времени ΔT (1, 3, 6, 30 с) значений тока и напряжения, определение мощности, принятой и отданной энергии на этих же интервалах;
- кратковременное и среднесрочное сохранение данных измерений, надежное сохранение текущих показаний счетчика;
- осуществление сетевого обмена с технологическими контроллерами или промышленными компьютерами ЛИВК (с использованием беспроводной технологии передачи) и передача текущих или исторических данных;
- периодическое вычисление спектральных оценок сигналов тока и напряжения;
- осциллографирование сигналов тока и напряжения на удаленном устройстве с заданной периодичностью обновления осциллограммы;
- сервисные функции (полуавтоматическая калибровка, конфигурирование сетевых и локальных настроек).

Системное программное обеспечение (СПО) счетчика может быть реализовано двумя способами. Первый способ позволяет обойтись без применения операционной системы реального времени (ОСРВ). Для этого необходимо, чтобы стек сетевых протоколов был реализован во встроенном программном обеспечении модуля ZigBee. Для организации многозадачности и событийной модели программного приложения наиболее подходящим инструментом в силу прозрачности и предельной вычислительной экономичности является псевдопараллельное выполнение задач на уровне препроцессора (директив компилятора). Наиболее известной и лаконичной реализацией следует признать библиотеку прототредов Адама Дункелса [9], которая поддерживает набор наиболее необходимых инструментов, позволяющих в линейном программном коде использовать многие преимущества и возможности многозадачных операционных систем, например, семафоры и мьютексы.

Второй способ организации многозадачности приложения и реализации сетевых протоколов предусматривает использование сетевой ОСРВ. Среди актуальных ОСРВ для встраиваемых систем (FreeRTOS, RIOT OS, TinyOS, Contiki) по совокупности требований (поддержка стека стандартных сетевых протоколов и 6LoWPAN, экономное использование опе-

ративной памяти и флэш-памяти, поддержка потоков с приоритетами, обеспечение жесткого реального времени) наиболее подходящей является ОСРВ RIOT, основанная на ядре Linux. Эта система является жесткой и позволяет ограничивать время на выполнение задачи встроенными таймерами до 1 мкс. В ОСРВ RIOT имеются в наличии готовые драйверы под различное аппаратное обеспечение. Операционная система RIOT эффективна с точки зрения энергопотребления, в том числе и благодаря планировщику, минимизирующему переключения контекстов.

Применение любого из названных выше способов реализации системного программного обеспечения счетчика позволяет использовать одну и ту же событийную модель с псевдопараллельным выполнением задач с назначенными приоритетами [9]. Диаграмма переходов состояний и соответствующих событий (диаграмма вызова функциональных задач), совмещенная с диаграммой потоков данных, приведена на рисунке 1.

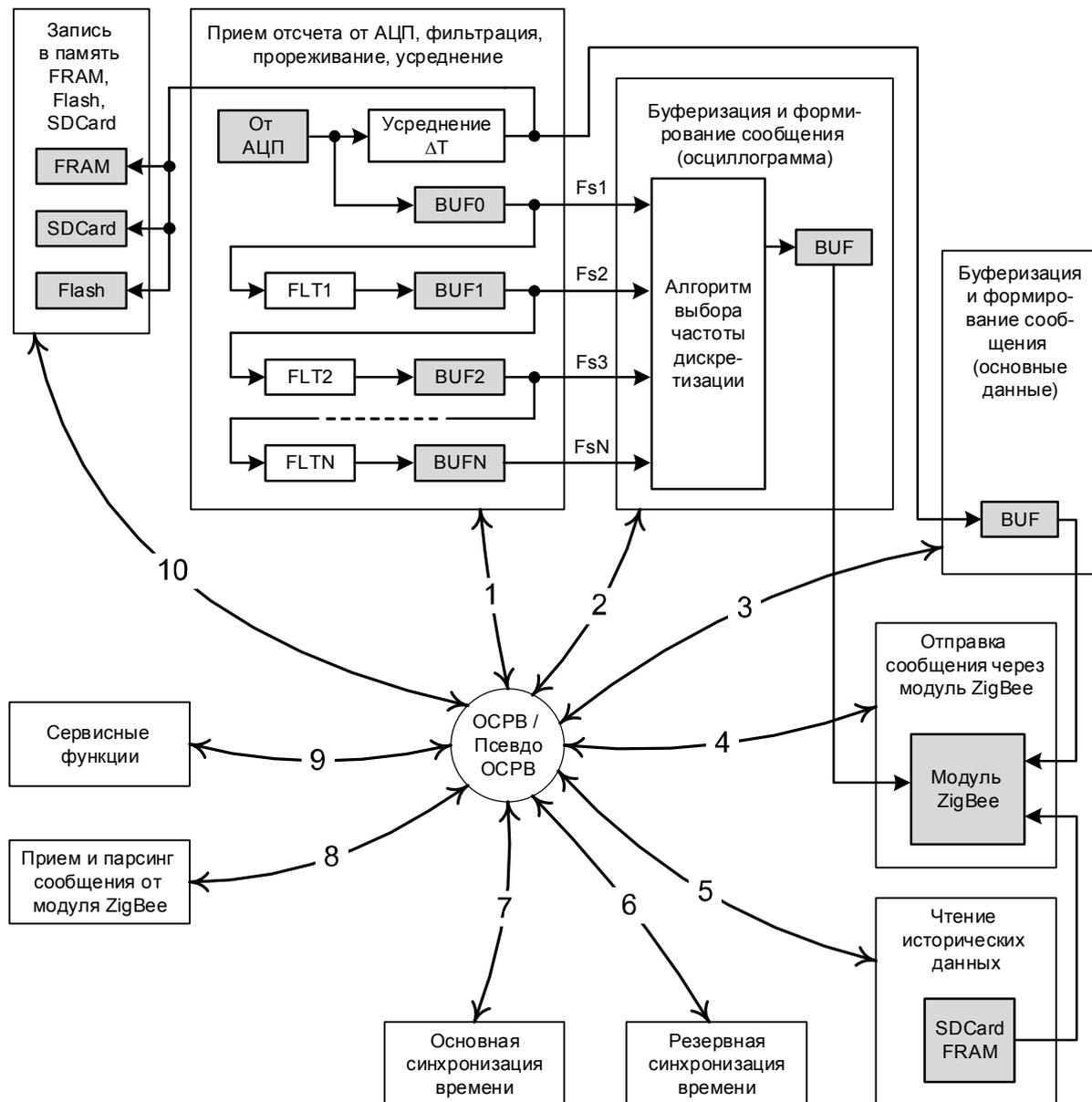


Рисунок 1 – Диаграмма переходов состояний и потоков данных во встроенном программном обеспечении счетчика

Переходы осуществляются из основного состояния – ожидания – к другим состояниям, соответствующим функциям-обработчикам функциональных задач. Условиями переходов являются указанные события, обозначенные номерами – это аппаратные прерывания, прерывания таймеров, программные семафоры (флаги). Список событий и их приоритетов приведен в таблице 2. Условием возврата для всех обработчиков является окончание процедуры обработки. Используется вытесняющая приоритетная модель, т. е. при возникновении события, имеющего более высокий приоритет, обработка задачи с низшим приоритетом приостанавливается.

Таблица 2 – Список событий для переходов к функциональным задачам

Номер события	Приоритет	Описание
1	Наивысший	Прерывание от АЦП (готовность данных в АЦП)
2	Средний	Флаг готовности данных в буфере прореживания
3	Средний	Флаг готовности данных в усредняющем буфере
4	Средний	Флаг запроса сообщения, флаг готовности сообщения
5	Низкий	Флаг запроса на передачу исторических данных по результатам парсинга
6	Высокий	Флаг синхронизации времени по информационной сети по результатам парсинга
7	Наивысший	Прерывание от модуля GPS/ГЛОНАСС
8	Высокий	Прерывание от модуля ZigBee
9	Низкий	Флаг на выполнение одной из сервисных функций по результатам парсинга
10	Средний	Флаг готовности данных в усредняющем буфере

Основной источник данных – АЦП, который формирует отсчеты измеряемых величин с частотой $F_{s1} = 16$ кГц. Усреднение на интервалах времени ΔT значений тока, напряжения и мгновенной мощности выполняется по формуле среднего арифметического.

Фильтрация с последующим постепенным прореживанием (двукратным на каждом шаге) с частотами дискретизации $F_{s2}, F_{s3}, \dots, F_{sN}$ выполняется для задачи осциллографирования сигнала в реальном времени на удаленном устройстве (таким устройством может быть как технологический контроллер, промышленный компьютер или даже ноутбук на тяговой подстанции, так и удаленное автоматизированное рабочее место, подключенное к серверу). Алгоритм выбора частоты дискретизации является адаптивным и подстраивается под пропускную способность информационной сети передачи данных (как на уровне «счетчик – концентратор»), так и на уровне «концентратор – сервер».

Уменьшение энергопотребления, размеров и стоимости измерительных устройств системы мониторинга и учета ресурсов достигается как за счет выбора современной элементной базы, так и за счет совершенствования программного обеспечения в направлении минимизации вычислительных затрат.

В измерительной системе большая доля вычислительных затрат приходится на алгоритмы цифровой обработки сигналов, такие как быстрое преобразование Фурье (БПФ) и вычисление корреляции сигналов (или свертки). Алгоритмы БПФ и быстрое действие их реализаций хорошо изучены [10], аппаратные ресурсы, требующиеся для их применения в различных задачах, могут быть оценены по имеющимся открытым данным.

Алгоритмы вычисления корреляции (свертки) в системе мониторинга и учета ресурсов используются при выполнении фильтрации сигналов (КИХ фильтры) и для выполнения корреляционного анализа сигналов, причем наибольших вычислительных затрат требует второй вариант использования. Для выбора аппаратной реализации измерительных устройств и используемых в программном обеспечении алгоритмов необходимо оценить быстрое действие функций вычисления корреляции на современных вычислительных устройствах.

Произведем анализ быстрого действия реализаций алгоритмов одномерной дискретной свертки, которая является математическим описанием операции цифровой фильтрации и корреляции. Дискретная свертка является наиболее существенной операцией в цифровой об-

работке сигналов, она строит последовательность $y(n)$, которая каждому целому числу последовательности определяет одно действительное или комплексное число, по двум последовательностям $x(n)$ и $h(n)$. Если область значений последовательности ограничена конечным множеством действительных или комплексных чисел, то такая последовательность называется цифровым сигналом.

Свертка и цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ) вычисляются по формуле [11]:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(n-k)h(k),$$

где $x(n)$ – входной сигнал; $y(n)$ – выходной сигнал; N – длина сигнала x ; $h(n)$ – импульсный отклик системы длиной L . Если длина выходного сигнала $y(n)$, рассчитанная по приведенной формуле, равна $(N + L - 1)$, для его вычисления требуется NL умножений и $(N - 1)(L - 1)$ сложений.

Недостаток вычисления операции дискретной свертки по указанной формуле заключается в том, что требуется значительное количество вычислительных операций. Другой недостаток состоит в том, что происходят временные задержки при обработке последовательности, поэтому используют секционирование сигнала и вычисление свертки для его блоков.

Для решения поставленной задачи существуют быстрые алгоритмы [12]. Любой алгоритм можно описывать через соотношение между входом и выходом либо детально предоставить информацию, объясняя его внутреннюю структуру. Если считать, что заданный алгоритм «вход-выход» имеет возможность быть описанным математической формулой, то такая реализация будет называться прямой. К быстрым алгоритмам относятся вычислительные процедуры, которые не являются очевидным способом вычисления требуемого входа, но при этом обеспечивают сокращение количества операций. Для оценки сложности алгоритма используют количество арифметических операций (сложения, вычитания, умножения, деления). Важно различать быстрый алгоритм, функцию, которую он вычисляет, и приложение, в котором используется. Например, необходимо различать дискретное преобразование Фурье (ДПФ) от быстрого преобразования Фурье (БПФ), так как второе преобразование является алгоритмом для первого [12].

Существует два подхода для быстрого вычисления свертки. Первый подход заключается в том, что входные последовательности x и y разбиваются на короткие секции (блоки). На выходе секции (блоки) преобразуются к циклической свертке. Следующим шагом циклическая свертка вычисляется через алгоритм БПФ или другие преобразования [4].

Второй подход заключается в том, что входные последовательности x и y разбиваются на последовательности из четных и нечетных отсчетов. Исходная свертка вычисляется с помощью вычисления трех сверток половинного размера. Расчет коротких сверток происходит в четыре раза быстрее, за счет чего сокращается общее число операций [12, 13].

В результате исследования быстродействия алгоритмов одномерной свертки на языке программирования C в среде разработки JetBrains CLion 2018.1 был получен график временных затрат в зависимости от длины фильтра для различных длин входного сигнала. Исходные данные: количество отсчетов при изменении длины фильтра от 100 до 900 и длины сигнала от 10000 до 40000, для получения статистически достоверного результата для каждой точки графика проводилось 10000 опытов. Зависимость быстродействия алгоритмов свертки при использовании различных фильтров приведена на рисунке 2 (в режиме Full производится вычисление свертки по $N + L - 1$ точкам, где N и L – длина фильтра и сигнала соответственно).

Из полученных результатов моделирования быстродействия функций корреляции следует, что для наиболее тяжелого случая из рассматриваемого диапазона длин фильтра и сигнала время работы на современном персональном компьютере составляет примерно полсекунды. Практически измеренное время выполнения операций свертки и вычисления корреляции

соответствует теоретическим данным (линейно увеличивается с ростом числа отсчетов в каждом из сигналов). Несмотря на большую приближенность подобной оценки можно сделать вывод о возможности выполнения корреляционного анализа сигнала при текущей реализации алгоритма в режиме реального времени [13].

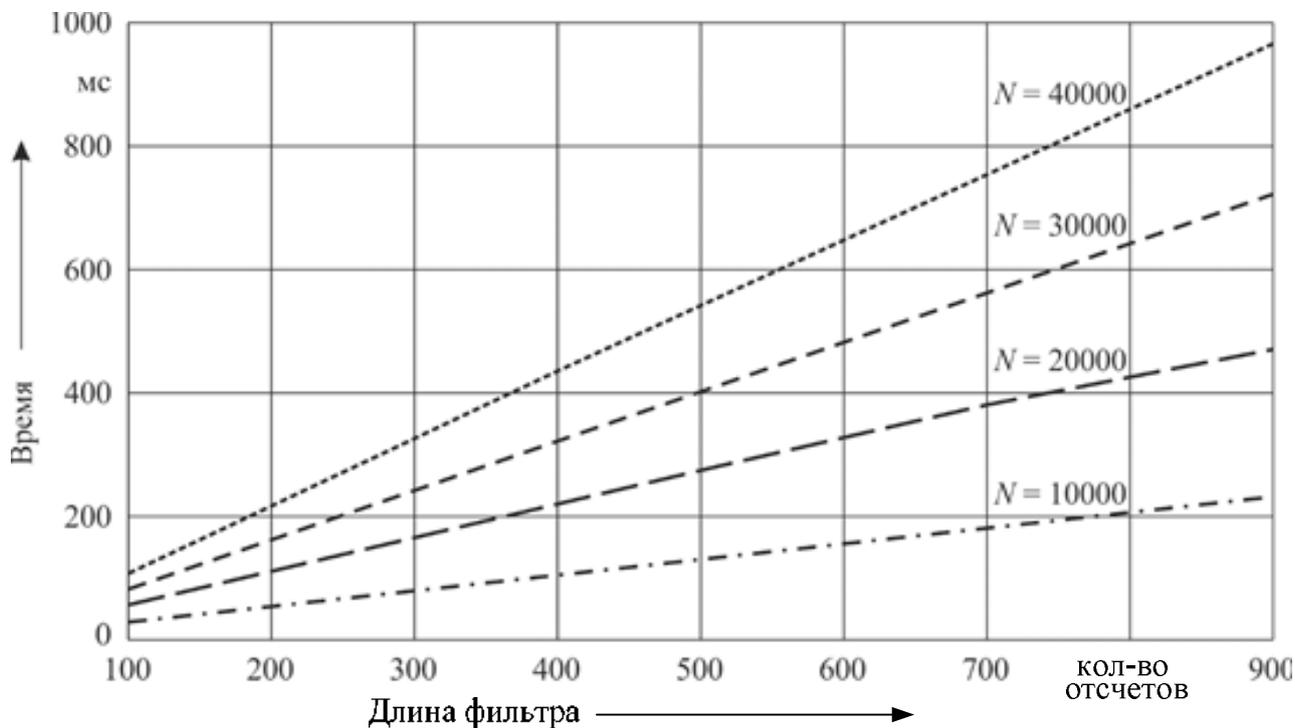


Рисунок 2 – Временные затраты на вычисление по алгоритму одномерной свертки на языке С (процессор Intel® Core™ i5-3550)

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

повышение информационной, а следовательно, и энергетической эффективности транспортной подсистемы возможно за счет применения протокола передачи технологической информации, который обеспечивает весь необходимый спектр коммуникационных и сервисных задач и отвечает требованиям по асинхронности взаимодействия, минимальному размеру сообщений и обеспечивает масштабирование и гибкую систему команд;

целесообразно применение алгоритма адаптивного ограничения трафика и технологии его применения для информационно-измерительной подсистемы;

для выполнения расчетов при измерении параметров сигналов с точностью, требуемой современными стандартами, в режиме реального времени достаточно вычислительных ресурсов современного персонального компьютера. Однако вычислительной мощности современных микропроцессоров, используемых в информационно-измерительных комплексах системы, недостаточно. Поэтому построение полнофункциональной измерительной системы и повышение энергетической эффективности информационно-измерительных комплексов возможно путем применения быстрых алгоритмов обработки сигналов.

Список литературы

1. Ожегов, А. Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Ожегов / Вятский гос. ун-т. – Киров, 2006. – 102 с.
2. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин,

С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 108 – 114.

3. Разработка современной информационно-аналитической системы для сталеплавно-го производства в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь» [Текст] / А. А. Сисев, К. А. Положенцев и др. // Электromеталлургия. – 2017. – № 9. – С. 7 – 12.

4. Алгоритмы и структурные решения для построения автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 124 – 134.

5. Малютин, А. Г. Архитектурные аспекты реализации корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов [Текст] / А. Г. Малютин, А. А. Лаврухин, А. С. Окишев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4 (32) – С. 130 – 141.

6. Информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин и др. // Интеллектуальные технологии на транспорте / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2015. – № 2 (2). – С. 10 – 19.

7. Плотников, Ю. В. Экспериментальная лабораторная установка для исследования блоков питания измерителей параметров тяговой сети постоянного тока 3,3 кВ [Текст] / Ю. В. Плотников // Материалы науч.-практ. конф. «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 14 – 20.

8. Пат. 165423 Российская Федерация, МПК В60М3/00, Н02J1/00. Блок мониторинга и учета электроэнергии [Текст] / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Никифоров М. М., Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Дегтерева А. В.; заявитель и патенто-обладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2015151245/11; заявл. 30.11.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.

9. Dunkels A., Schmidt O., Voigt T., Ali M. Protothreads: Simplifying Event-Driven Programming of Memory-Constrained Embedded Systems // In Proceedings of the Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2006), Boulder, Colorado, USA, November 1–3, 2006 <http://dunkels.com/adam/dunkels06protothreads.pdf>. 10. FFTW Benchmark Results [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fftw.org/speed/>, свободный.

11. Макклеллан, Д. Х. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов [Текст] / Д. Х. Макклеллан, Ч. М. Рейдер. – М.: Радио и связь, 1983. – Т. 20. – 264 с.

12. Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов [Текст] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.

13. Mou Z. J., Duhamel P. Fast FIR filtering: Algorithms and implementations, *Signal Processing*, 1987, Vol. 13, Issue 4, pp. 377 – 384.

14. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

References

1. Ozhegov A. N. *Sistemy ASKUE: Uchebnoe posobie* (Automated systems of commercial electricity metering: study guide). Kirov: ViatSU, 2006, 102 p.

2. Cheremisin V. T., Ushakov S U., Kashtanov A. L. Global automatic electric power measuring system for rolling stock [Edinaya avtomatizirovannaya sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoyannogo toka]. *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 3 (15), pp. 108 – 114.

3. Sisev A.A. Design of up-to-date information-analytical system for steel-making production at JSC "Metallurgical plant 'Elektrostal'" [Razrabotka sovremennoy informacionno-analiticheskoy sistemy dlya staleplavilnogo proizvodstva v usloviyah AO "Metallurgicheskiy zavod 'Elektrostal'"]. *Electrometallurgiya – Russian metallurgy*, 2017, no. 9, pp. 7 – 12.
4. Lavrukhin A. A., Malyutin A. G., Okishev A. S., Kildibekov A. B. Algorithms and structural solutions for construction the system of monitoring and electricity metering on the feeders of the contact network [Algoritmy i strukturnyye resheniya dlya postroyeniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa i ucheta elektroenergii na fiderakh kontaktnoy seti]. *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 4 (28), pp. 124 – 134.
5. Malyutin A. G., Lavrukhin A. A., Okishev A. S. Architectural aspects of the implementation of the corporate information system for monitoring and resources accounting [Arkhitekturnye aspekty realizacii korporativnoy informacionnoy sistemy monitoring I ucheta resursov]. *Izvestia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (32), pp. 130 – 141.
6. Chizhma S. N., Lavrukhin A. A., Malyutin A. G., Okishev A. S. Information system of operational control parameters of electricity in the traction power supply network [Informatsionnaya sistema operativnogo kontrolya parametrov elektroenergii v seti tiagovogo elektrosnabzheniya]. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*, 2015, no. 2, pp. 10 – 19.
7. Plotnikov U. V. Experimental laboratory setup for the study of power supply units for measuring parameters of a 3.3 kV DC network [Eksperimental'naya laboratornaya ustanovka dlya issledovaniy blokov pitaniya izmeriteley ritma seti postoyannogo toka 3,3 kV]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovacionniye proekti i noviyte tekhnologii v obrazovanii, promishlennosti i na transporte"* (Abstracts of the conference "Innovative projects and new technologies in education, industry and transport"). – Omsk, 2018. pp. 14 – 20.
8. Cheremisin V. T., Chizhma S. N., Nikiforov M. M., Lavrukhin A. A., Malyutin A. G., Okishev A. S., Plotnikov Yu. V., Degteriova A. V. *Patent RU165423U1*, 20.10.2016.
9. Dunkels A., Schmidt O., Voigt T., Ali M. Protothreads: Simplifying Event-Driven Programming of Memory-Constrained Embedded Systems. In Proceedings of the Fourth ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2006), Boulder, Colorado, USA, November 1–3, 2006, <http://dunkels.com/adam/dunkels06protothreads.pdf>.
10. FFTW Benchmark Results. – URL: <http://www.fftw.org/speed/>.
11. McClellan D. H., Raider Ch. M. *Primeneniye teorii chisel v cifrovoy obrabotke signalov* (The application of number theory in digital signal processing). Moscow: Radio and Communication Publ, 1983, vol. 20.
12. Bleyhut R. *Bystrye algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov* (Rapid algorithms for digital signal processing). Moscow: Mir Publ., 1989, 448 p.
13. Mou Z. J., Duhamel P. Fast FIR filtering: Algorithms and implementations, *Signal Processing*, 1987, Vol. 13, Issue 4, pp. 377 – 384.
14. Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* (Theory and application of digital signal processing). Moscow: Mir Publ., 1978, 848 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаврухин Андрей Александрович
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-05-89.
E-mail: LavruhinAA@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.
Ph.D. in Technical Sciences, the senior lecturer of
the department «Automatic and control systems», OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-05-89.
E-mail: LavruhinAA@gmail.com

Малютин Андрей Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

Malyutin Andrey Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph.D. in Technical Sciences, head of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

Васеева Татьяна Валериевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: VaseevaTV@omgups.ru

Vaseeva Tatiana Valerievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Graduate student of the department «Automation and control systems», OSTU

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: VaseevaTV@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лаврухин, А. А. Повышение эффективности информационно-измерительного комплекса автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии [Текст] / А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин, Т. В. Васеева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 120 – 132.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lavrukhin A. A. Improving the efficiency of the information-measuring complex of the automated system for monitoring and metering of electricity. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 120 – 132 (In Russian).

УДК 621.311

В. Е. Митрохин¹, С. Н. Занкин²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Информационно-технологическая сервисная компания (ООО «ИТСК»), г. Омск, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Аннотация. Разработана методика, позволяющая выполнять расчет параметров коаксиального кабеля с учетом частоты передаваемого сигнала. Проведен сравнительный анализ значений параметров кабеля РК 50-7-28 и RG142, полученных в результате измерений с помощью анализатора цепей, взятых из справочников с соответствующими результатами расчетов. Получены оценки точности расчетов, указывающие на необходимость учета дополнительных факторов с целью более корректного учета затухания в кабеле во всем диапазоне используемых частот.

Ключевые слова: анализатор спектра, волновое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, коаксиальный кабель, коэффициент затухания коаксиального кабеля в системах железнодорожной связи, помехозащищенность сетевых каналов объектов РЖД.

Valery E. Mitrokhin¹, Sergey N. Zankin²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Information technology service company (Ltd «ITSC»), Omsk, the Russian Federation

EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE MODEL OF THE COAXIAL CABLE WITH THE BROAD FREQUENCIES SPECTRUM

***Annotation.** Developed Methodology let make the calculation of coaxial cable parameters with account of the frequency of the transmitted signal. The comparative analysis of parameters of RC 50-7-28 and RG142 cables has been made with the values have been got by the measuring with the circuit analyzer according to the reference book with the results of the calculations. Check the accuracy of the calculation has pointed out the necessity for account of complementary factors for the purpose of much more correct account cable attenuation in the frequency spectrum.*

***Keywords:** circuit analyzer, characteristic impedance, dielectric permittivity, coaxial cable, coaxial cable attenuation coefficient in railway communication systems, noise immunity of the network channels of Russian Railways objects.*

Коаксиальный кабель нашел широкое применение во всех сферах народного хозяйства и в быту, как правило, для передачи сигнала высокой частоты. Перевод электрифицированных железнодорожных линий на высокоскоростное движение может потребовать модернизации как системы тягового электроснабжения, так и системы станционной связи. В качестве технических средств модернизации системы тягового электроснабжения коаксиальный кабель может быть альтернативой обратному проводу [1]. В системах станционной связи и радиосвязи коаксиальный кабель часто является основой фидера или антенно-фидерного устройства (АФУ).

Станции, перегоны и другие объекты железной дороги имеют стратегическое значение, следовательно, основной задачей информационной безопасности является повышение помехозащищенности сетевых каналов, что подтверждает востребованность кабельных сетей на железнодорожных объектах несмотря на развитие беспроводных технологий.

Современные радиотехнические инженерные комплексы используют ресурсы сети для передачи информационных и управляющих пакетов в диапазоне частот 10 ГГц и выше, что предъявляет определенные требования к параметрам применяемого кабеля и указывает на необходимость моделирования сети и ее отдельных элементов. Параллельно решается задача экономической эффективности выбора между современным дорогостоящим кабелем и более доступным по цене кабелем старого парка.

Несмотря на большое количество данных о параметрах коаксиальных кабелей, приведенных в соответствующих справочниках, данные по кабелям, снятым с производства, не охватывают диапазоны частот выше 1 ГГц. Это еще раз подтверждает необходимость использования средств вычислительной техники для определения коэффициента затухания коаксиального кабеля в системах железнодорожной связи.

Известные методы расчета параметров кабельных линий [2 – 6], как показано в работе [7], позволяют вычислять параметры кабельных линий для частот в пределах сотен мегагерц. Вопросы корректности применения методик расчета для более высоких частот методически проработаны недостаточно.

Таким образом, верификация существующих методик расчета является актуальной задачей, решение которой позволит скорректировать существующие методики, лежащие в основе моделей и программ для выполнения радиотехнических расчетов.

Целью данной работы является демонстрация выявленных несоответствий вычисляемых параметров модели [7] и результатов натурального эксперимента в диапазоне высоких частот.

Как известно, коаксиальный кабель состоит из внутреннего (жилы) и внешнего (экран) проводников, заключающих между собой диэлектрик, а также диэлектрической оболочки, покрывающей экран. Благодаря поглощению заземленным экраном внешних электромагнитных помех, способных влиять на передаваемый по жиле сигнал, коаксиальный кабель предпочтительнее проводных фидерных линий при применении в антенно-фидерных устройствах.

В рассматриваемой в статье модели коаксиального кабеля полагается, что внутренний проводник выполнен однородным стержнем постоянной толщины, внешний – цилиндрическим слоем бесконечной толщины.

Условия передачи электрических сигналов по коаксиальному кабелю определяются электромагнитным полем, представляющим собой единство двух составляющих – электрического (\vec{E}) и магнитного (\vec{H}) полей, создаваемым током в проводниках и диэлектрике.

При определении погонного затухания в кабеле будем считать, что потери в проводниках зависят от рабочей частоты, так как вследствие скин-эффекта ток течет лишь в тонком поверхностном слое, а потери в диэлектрике определены затратами энергии электромагнитного поля на переориентацию молекул.

Из закона полного тока с учетом постоянства значение вектора магнитного поля в каждой точке на поверхности проводника – ток, протекающий через поперечное сечение проводника:

$$I = H_{\varphi} \cdot \pi d, \quad (1)$$

где d – диаметр проводника; H_{φ} – тангенциальная составляющая магнитного поля на поверхности проводника.

Тогда полное сопротивление на участке цепи длиной Δl

$$\Delta Z = \frac{U}{I} = \frac{E_z \Delta l}{H_{\varphi} \cdot \pi d}, \quad (2)$$

где U – напряжение между концами проводника длины Δl ;

E_z – продольная составляющая электрического поля.

Согласно граничным условиям Леонтовича [4]

$$E_z = W \cdot H_{\varphi}, \quad (3)$$

где $W = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\sigma}}$ – поверхностное сопротивление;

σ – удельная проводимость;

μ – удельная магнитная проницаемость;

μ_0 – магнитная постоянная.

Сопротивление проводника длиной Δl

$$Z = R + i\omega L = \frac{W \Delta l}{\pi d} = \frac{\Delta l}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\sigma}} + i \frac{\Delta l}{\pi d} \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{2\omega \sigma}}. \quad (4)$$

Следовательно, погонные сопротивление и индуктивность внутреннего проводника можно рассчитать по формулам:

$$R_a = \frac{\Delta l}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\sigma_a}}, \quad L_a = \frac{\Delta l}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{\mu_a}{2\omega \sigma_a}}, \quad (5)$$

где r_a – радиус внутреннего проводника; $\mu_a = \mu \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость внутреннего проводника.

Аналогичные соображения приводят к формуле для вычисления волнового сопротивление внешнего проводника с внутренним радиусом r_a :

$$Z_b = R_b + i\omega L_b = \frac{1}{2\pi r_b} \sqrt{\frac{\omega \mu_b}{2\sigma_b}} + i \frac{\omega}{2\pi r_b} \sqrt{\frac{\mu_b}{2\omega \sigma_b}}. \quad (6)$$

При расчете полной погонной индуктивности кабеля учитывается межпроводниковая индуктивность $L_{\text{вн}}$, зависящая от магнитного потока в пространстве между проводниками [5]:

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_d}{2\pi I} \int_{r_a}^{r_b} I \frac{dr}{r} = \frac{\mu_d}{2\pi} \ln \frac{r_b}{r_a}, \quad (7)$$

где μ_d – абсолютная магнитная проницаемость диэлектрика.

Полное сопротивление погонного сопротивления цепи

$$Z = R + i\omega L = (R_a + R_b) + i\omega(L_a + L_b + L_{вн}). \quad (8)$$

Для определения погонной емкости кабеля его отрезок длиной Δl можно считать коаксиальным конденсатором емкости ΔC , заряд на длине Δl которого определяется из равенства $\Delta q = U \Delta C$, где U – напряжение между жилами.

Из формулы определения заряда конденсатора на отрезке длиной Δl с помощью поверхностного интеграла [4] $\Delta q = \epsilon \epsilon_0 \oiint_S \vec{E} \cdot \vec{n} ds = \epsilon \epsilon_0 E_r S = 2\pi r \epsilon \epsilon_0 E_r \Delta l$ (\vec{n} – вектор нормали к

поверхности) можно определить радиальную составляющую электрического поля

$$E_r = \frac{\Delta q}{\Delta l} \frac{1}{2\pi r \epsilon \epsilon_0}, \text{ а из равенства } U = \int_{r_a}^{r_b} E_r dr = \frac{\Delta q}{\Delta l} \frac{1}{2\pi \epsilon \epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \text{ – емкость конденсатора длиной } \Delta l:$$

$$\Delta C = \frac{\Delta q}{U} = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0 \Delta l}{\ln \frac{r_b}{r_a}}.$$

Тогда емкость кабеля на единицу длины

$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{r_b}{r_a}}. \quad (9)$$

Так как $j_r = \sigma_d E_r = \frac{\Delta q}{\Delta l} \cdot \frac{\sigma_d}{2\pi r \epsilon \epsilon_0}$ и $I = j_r S = j_r 2\pi r \Delta l = \frac{\Delta q \sigma_d}{\epsilon \epsilon_0 \rho} = \frac{U \Delta C \sigma_d}{\epsilon \epsilon_0 \rho} = U \Delta G$, то проводимость конденсатора длиной Δl $\Delta G = \Delta C \omega \operatorname{tg} \delta$, где σ_d – диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_d}{\omega \epsilon \epsilon_0}$ – тангенс угла диэлектрических потерь. Получаем формулу для вычисления погонной проводимости кабеля:

$$G = C \omega \operatorname{tg} \delta. \quad (10)$$

Коэффициент распространения и волновое сопротивление определяются по формулам [2, 5]:

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}; \quad (11)$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}, \quad (12)$$

где α – коэффициент затухания; β – коэффициент фазы.

Погонные параметры R, L, C, G определяют по формулам (5), (7), (9), (10).

В области высоких частот $\omega L \gg R, \omega C \gg G$. Тогда, учитывая, что $\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{\alpha}{2}$ при $\alpha \ll 1$, получаем приближенную формулу для расчета коэффициента распространения:

$$\gamma = \sqrt{\omega^2 LC} \left(i + \left(\frac{G}{2\omega C} + \frac{R}{2\omega L} \right) \right), \quad (13)$$

откуда

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \operatorname{Re} \gamma = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (14)$$

где α_m, α_d – коэффициенты затухания в кабеле, связанные с сопротивлением проводника и диэлектрика соответственно.

Для сравнения результатов расчета в рамках рассмотренной методики воспользуемся формулами для вычисления сопротивления и индуктивности в рамках модели коаксиального кабеля, учитывающей внешний радиус r_c внешнего проводника [2, 3]:

$$Z_a = \frac{\sqrt{i}}{r_a} \sqrt{\frac{\rho_a \mu_a f}{2\pi}} + \frac{\rho_a}{4\pi r_a^2}; \quad (15)$$

$$Z_b = \frac{\sqrt{i} k_b \rho_b}{2\pi r_b} \left(\operatorname{cth}(\sqrt{i} k_b t) - \frac{1}{8\sqrt{i} k_b} \left(\frac{3}{r_c} + \frac{1}{r_b} \right) \right), \quad (16)$$

где $Z_a = R_a + i\omega L_a$, $Z_b = R_b + i\omega L_b$.

Таким образом, рассмотрены модели коаксиального кабеля, учитывающие потери энергии в проводниках и диэлектрике, входными параметрами которых являются геометрические параметры кабеля и физические параметры проводников и диэлектрика. В рамках рассмотренной модели выражения (5) – (7), (14), (15) определяют погонные сопротивление и индуктивность, по формулам (9), (10) вычисляют емкость и проводимость, с помощью выражений (11), (13) – коэффициенты затухания и фазы. Формула (12) определяет волновое сопротивление.

Целью проводимого эксперимента являлась проверка соответствия эмпирических и расчетных значений погонного коэффициента затухания радиочастотных кабелей РК 50-7-28 и RG142.

Измерения параметров кабеля РК 50-7-28 были проведены с помощью анализатора цепей R&S ZVL 13 с погрешностью не менее 1%.

Предварительно была проведена полная двухпортовая калибровка TOSM (Through – перемычка между портами, Open – холостой ход, Short – короткое замыкание, Match1 – согласованная нагрузка по каждому из портов) при помощи калибровочного набора, включающего в себя кабель ZV-Z191. Подробно данный способ калибровки, называемый также SOLT, описан в источнике [8].

Схема измерения приведена на рисунке 1. На схеме X1, X2 – вилки N типа.

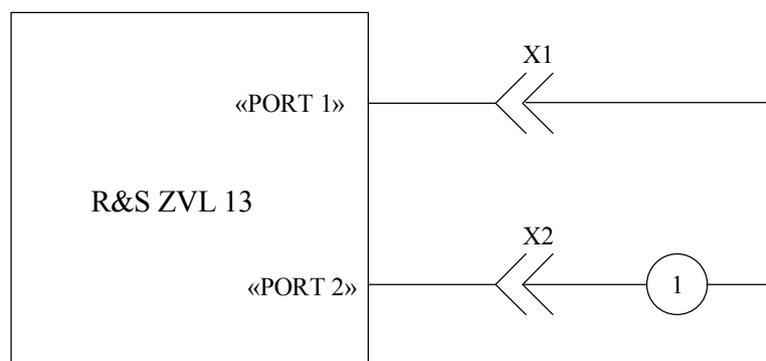


Рисунок 1 – Схема измерения параметров кабеля

Результаты данных измерений, практически совпадающие с данными справочников [1, 2], стали основой для проведения верификации методики расчета параметров коаксиального кабеля.

Данные для расчета параметров радиочастотного кабеля РК 50-7-28 [9, 10]: $r_a = 1,25$ мм, $r_b = 3,63$ мм, $r_c = 3,93$ мм – радиусы проводников, изготовленных из меди. Диэлектриком в выбранном кабеле служит политетрафторэтилен (фторопласт-4);

$\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м – удельное сопротивление медного проводника;

$\mu_a = \mu_b = \mu_r \cdot \mu_0$;

$\mu_r = 1$ – удельная магнитная проницаемость меди;

$\rho_d = 10^{17}$ Ом·м – удельное сопротивление диэлектрика;

$\epsilon_r = 2,0$ – относительная диэлектрическая проницаемость.

В результате расчетов получены расчетные, в результате измерений – эмпирические (опытные) значения коэффициента затухания в диапазоне частот от 1 МГц до 5 ГГц, которые приведены в таблице, где $\alpha_{расч}(f)$ – значения коэффициента затухания, полученные из формул (5) – (9), (11); $\alpha_{расч1}(f)$ – значения коэффициента затухания, полученные из формул (8), (9), (11), (14), (15).

Зависимость параметров кабеля от частоты

f , МГц	$\alpha_m(f), \frac{Дб}{100 м}$	$\alpha_d(f), \frac{Дб}{100 м}$	$\alpha_{расч}(f), \frac{Дб}{100 м}$	$\alpha_{расч1}(f), \frac{Дб}{100 м}$	$\alpha_{эмп}(f), \frac{Дб}{100 м}$
1	0,431	0,0026	0,4336	0,4036	0,251
2	0,609	0,00519	0,61419	0,58118	0,323
3	0,746	0,0078	0,7538	0,7018	0,385
4	0,861	0,01	0,871	0,812	0,516
6	1,054	0,015	1,069	0,913	0,612
8	1,217	0,021	1,238	1,159	0,812
10	1,361	0,026	1,387	1,298	1,161
20	1,924	0,051	1,975	1,85	2,323
30	2,357	0,077	2,434	2,28	3,032
40	2,721	0,103	2,824	2,647	3,484
50	3,042	0,128	3,17	2,973	3,871
100	4,302	0,257	4,559	4,279	5,677
200	6,084	0,532	6,616	6,202	8,516
300	7,452	0,797	8,249	7,737	10,840
400	8,604	1,063	9,667	9,072	12,900
500	9,62	1,329	10,949	10,278	14,650
600	10,538	1,594	12,132	11,394	16,264
700	11,383	1,86	13,243	12,44	18,061
800	12,168	2,126	14,294	13,432	19,355
900	12,907	2,391	15,298	14,379	20,907
1000	13,605	2,563	16,168	15,289	22,393
2000	19,24	5,126	24,366	23,128	35,421
3000	23,564	7,689	31,253	29,742	45,941
4000	27,209	10,251	37,46	35,722	56,650
5000	30,421	12,813	43,234	41,297	66,135

Эмпирические значения коэффициента затухания практически не отличаются от данных, приведенных в ГОСТе [9] на соответствующих частотах, что подтверждает достоверность проведенных измерений.

Данные таблицы указывают на существенные различия значений теоретического и эмпирического коэффициентов затухания на частотах выше 100 МГц, что демонстрируют и графики, приведенные на рисунках 2 и 3. Из графиков можно сделать вывод о непротиворечивости методик расчета.

При измерении и вычислении по тем же методикам коэффициента затухания в кабеле RG142 наблюдается аналогичная картина.

Графики, приведенные на рисунках 4 – 6, отображают частотные зависимости коэффициентов затухания α_m и α_d , связанных с затуханием в кабеле, определяемым сопротивлением проводника и диэлектрика соответственно, а также зависимость суммарного коэффициента $\alpha_{расч}(f) = \alpha_d(f) + \alpha_m(f)$.

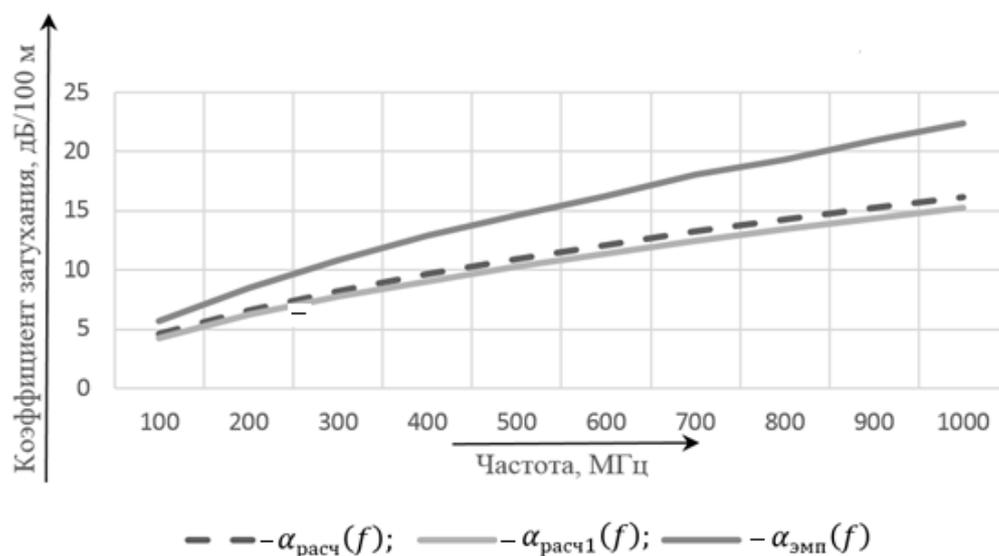


Рисунок 2 – Графики коэффициентов затухания кабеля РК 50-7-28 в диапазоне 100 МГц – 1 ГГц.

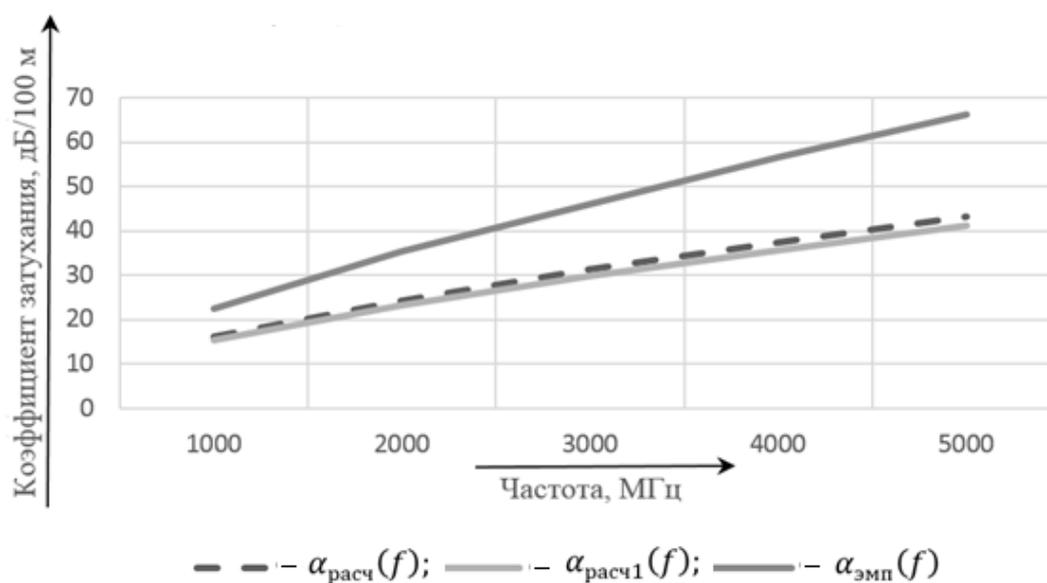


Рисунок 3 – Графики коэффициентов затухания кабеля РК 50-7-28 в диапазоне 1 – 5 ГГц

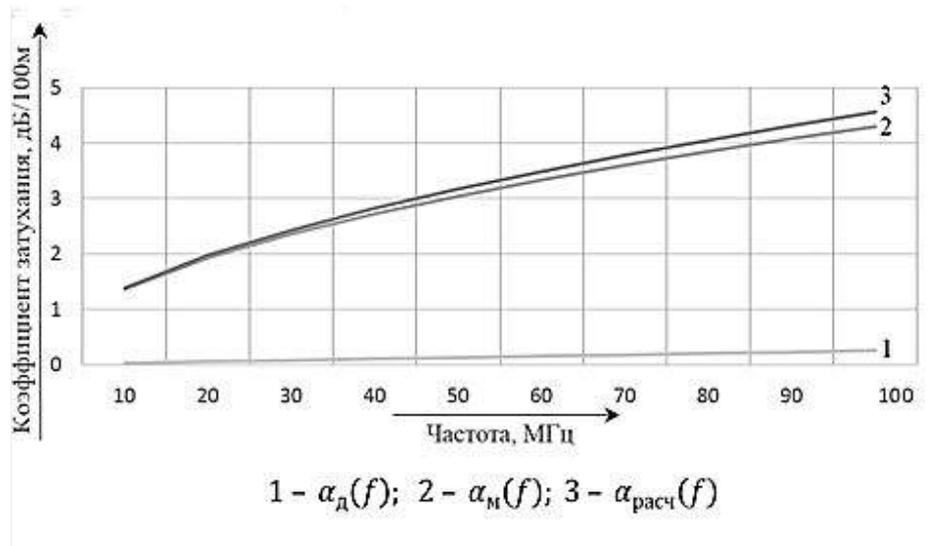


Рисунок 4 – Графики коэффициентов затухания в диапазоне 10 – 100 МГц

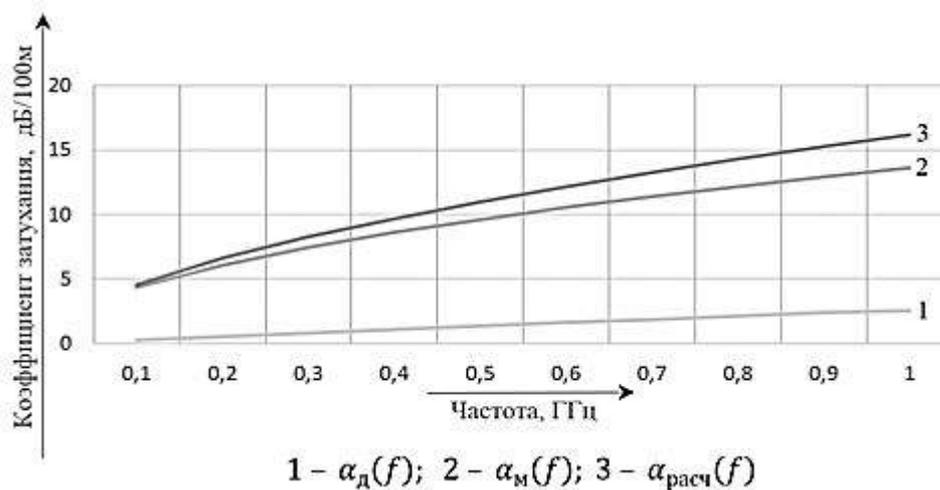


Рисунок 5 – Графики коэффициентов затухания в диапазоне 0,1 – 1,0 ГГц

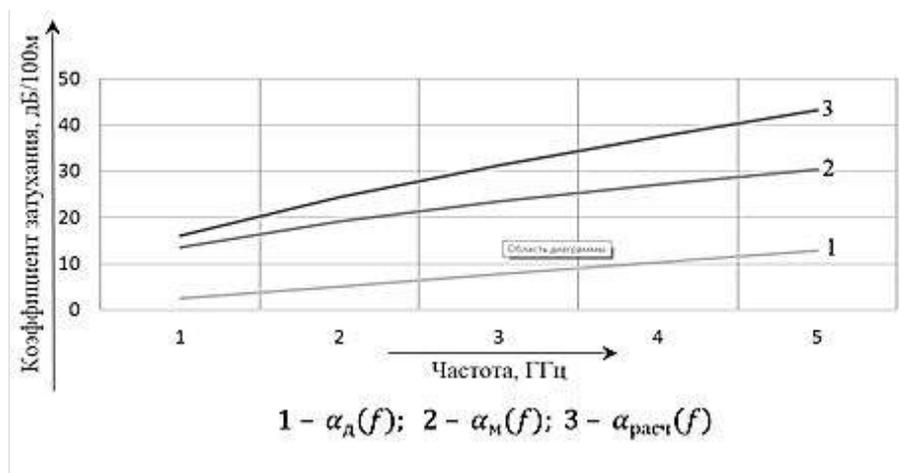


Рисунок 6 – Графики коэффициентов затухания в диапазоне 1 – 5 ГГц

Графики визуализируют линейную зависимость коэффициента затухания $\alpha_d(f)$ в диэлектрике от частоты сигнала и пропорциональность коэффициента $\alpha_m(f)$ величине \sqrt{f} , что подтверждает увеличение доли затухания в диэлектрике в общем затухании кабеля с ростом частоты.

Значения, взятые из ГОСТа на исследуемые кабели, подтверждают достоверность проведенных измерений с помощью анализатора цепей.

При расчете коэффициента затухания с помощью различных методик выявлены существенные расхождения между расчетными и экспериментальными данными для области частотного спектра выше 100 МГц, что указывает на системный характер выявленной проблемы и необходимость проведения исследований с целью учета дополнительных факторов, которые могут повысить точность моделирования. Ввиду явного преобладания доли затухания в проводнике даже на частотах 5 ГГц и выше можно предположить, что учтены не все факторы, определяющие затухание сигнала в диэлектрике. Одним из путей решения данной проблемы может стать измерение диэлектрической проницаемости материала диэлектрика.

Список литературы

1. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении высокоскоростных поездов [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 126 – 134.
2. Гроднев, И. И. Кабельные линии связи: Учебное пособие [Текст] / И. И. Гроднев, В. Н. Кулешов, В. В. Соколов – М.: Радио и связь, 1960. – 496 с.
3. Гроднев, И. И. Линии связи: Учебник [Текст] / И. И. Гроднев, С. М. Верник. – М.: Радио и связь, 1988. – 543 с.
4. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие [Текст] / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1981. – 544 с.
5. Парфенов, Ю. А. Кабели электросвязи: Учебник [Текст] / Ю. А. Парфенов. – М.: Эко-рендгиз, 2003. – 253 с.
6. Коваленко, В. И. Теория передачи по линиям электросвязи: Учебник [Текст] / В. И. Коваленко. – М.: Связьтехиздат, 1937. – 435 с.
7. Митрохин, В. Е. Методика расчета параметров коаксиального кабеля в широком диапазоне частот [Текст] / В. Е. Митрохин, С. Н. Занкин // Тезисы докл. IX ежегодной науч.-практ. конф. «Приборостроение и информационные технологии» / Омский научно-исследоват. ин-т приборостроения. – Омск, 2017. – С. 81 – 86.
8. Губа, В. Г. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей [Текст] / В. Г. Губа, А. А. Ладур, А. А. Савин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 149 – 155.
9. ГОСТ 11326.87-79. Кабель радиочастотный марки РК 50-7-28 [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – С. 1 – 6.
10. Алиев, И. И. Кабельные изделия: Справочник [Текст] / И. И. Алиев, С. Б. Казанский – М.: ИП Радиософт, 2002. – 224 с.

References

1. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdiyenko I.M., Bezridniy E.S. Modeling of traction power supply system models at the movement of high-speed trains [Modelirovaniye rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya pri dvizhenii vysokoskorostnykh poyezdov]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye – The Journal of Modern Technologies, System Analysis, Modeling*, 2017, no. 3 (55), pp. 126 – 134.
2. Grodnev, I. I., Kuleshov V.N., Sokolov V.V. *Kabel'nyye linii svyazi* (Cable communication lines). Moscow: Radio and communication, 1960, 496 p.

3. Grodnev I. I., Vernik S. M. *Linii svyazi* (Communication lines). Moscow: Radio and communication, 1988, 543 p.
4. Nikolsky V.V., Nikolskaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* (Elektrodinamika and the radiation of radio waves). Moscow: Science, 1981, 544 p.
5. Parfyonov Yu.A. *Telekommunikatsionnyye kabeli* (Telecommunication cables). Moscow: Ekotrendgiz, 2003, 253 p.
6. Kovalenko V.I. *Teoriya peredachi po liniyam elektrosvyazi* (The theory of transfer on lines of telecommunication). Moscow: Svyaztekhizdat, 1937, 435 p.
7. Mitrokhin V.E., Zankin S.N. A method of calculation of parameters of the coaxial cable with the broad frequencies spectrum [Metodika rascheta parametrov koaksial'nogo kabelya v shirokom diapazone chastot]. *Tezisy dokladov IKH yezhegodnoy nauch.-prakt. konf. «Priborostroyeniye i informatsionnyye tekhnologii»* (Theses of reports of IX annual scientific and practical conference «Instrumentation and information technology»). Omsk, 2017, pp. 81 – 86.
8. Guba V.G., Ladur A.A., Savin A.A. Classification and analysis of calibration methods of vector network analyzers [Metody klassifikatsii i metody kalibrovki vektornogo analizatora]. *Doklady TUSURa – Reports TUSUR*, no.2 (24), Part 1 of December 2011, pp. 149 – 155.
9. *Kabel' radiochastotnyy marki RK 50-7-28, GOST 11326.87-79* (A cable radio-frequency the PK 50-7-28 brands. The Interstate standard). Moscow: Standards Publishing House, 2004, 6 p.
10. Aliev I. I., Kazansky S. B. *Kabel'nyye izdeliya* (Cable Products). Moscow: IP RadioSoft, 2002. 224 p

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митрохин Валерий Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (903) 926-74-70.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Занкин Сергей Николаевич

Информационно-технологическая сервисная компания (ООО «ИТСК»), Дирекция переработки и сбыта, Департамент по ИТ и связи «Омск», отдел ИТ-инфраструктуры, ведущий специалист.

Губкина пр., д. 1/4, г. Омск, 644040, Российская Федерация

Тел.: +7(913)6163548.

E-mail: zan_zanych@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Митрохин, В. Е. Экспериментальная проверка адекватности модели коаксиального кабеля в широком диапазоне частот/ В. Е. Митрохин, С. Н. Занкин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 132 – 141.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mitrokhin Valeriy Evgenyevich

Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx st., Omsk, 644046, Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Telecommunication, Radio Engineering Systems and Networks», OSTU.

Phone: +7 (903) 926-74-70.

E-mail: mitrokhin@list.ru

Zankin Sergey Nikolaevich

Information technology service company (Ltd «ITSC»), Direction of processing and sales, Department of IT and Communications «Omsk», IT department, Leading Specialist.

1/4, pr Gubkin, Omsk, 644046, Russian Federation.

Phone: +7(913)6163548.

E-mail: zan_zanych@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mitrokhin, V. E. Experimental validation of model of the coaxial cable with the broad frequencies spectrum/ V. E. Mitrokhin, S. N. Zankin// Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 4, no 36, pp. 132 – 141 (In Russian).

Е. А. Сидорова, С. П. Железняк, С. О. Подгорная

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

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ
ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ ЛОКОМОТИВОВ**

***Аннотация.** Статья посвящена особенностям реализации пользовательского интерфейса автоматизированной информационной системы обработки и анализа данных об энергозатратах локомотивов, обеспечивающего ее эффективное функционирование с целью совершенствования управления расходом топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.*

***Ключевые слова:** показатели энергопотребления на тягу поездов, информационные потребности пользователя, графический пользовательский интерфейс, эффективная обработка и представление данных.*

Elena A. Sidorova, Svetlana P. Zheleznyak, Svetlana O. Podgornaya

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

**ENERGY CONSUMPTION CONTROL FOR TRAIN TRACTION
BY IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED
SYSTEM FOR PROCESSING INFORMATION ABOUT THE ENERGY
CONSUMPTION OF LOCOMOTIVES**

***Abstract.** The article is devoted to the features of the implementation of the user interface of an automated information system for processing and analyzing data about the energy consumption of locomotives, ensuring its effective functioning in order to improve the control of fuel and energy resources consumption for train traction.*

***Keywords:** indicators of energy consumption for train traction, user information needs; graphical user interface; information effective processing and representation.*

В современных условиях все более актуальной становится проблема эффективного управления топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР), решение которой является одной из важнейших задач энергетической стратегии ОАО «Российские железные дороги (РЖД)» [1]. Достижение ключевых показателей энергосбережения во всех сферах деятельности холдинга определяется организационно-техническими мероприятиями и внедрением инновационных технологий.

Более чем три четверти от общего объема энергопотребления на сети железных дорог приходится на перевозочный процесс [2], основным показателем энергетической эффективности которого является удельный расход энергии (УРЭ). Динамика изменения УРЭ в большой степени определяется множеством эксплуатационных факторов [3], характер и степень влияния которых необходимо учитывать при оценке показателей энергозатрат на тягу поездов и выяснении причин их изменения. Задача определения потенциала энергосбережения требует комплексного подхода и включает в себя анализ эксплуатационных показателей на всех уровнях организационной структуры ОАО «РЖД». Для решения указанной задачи специалистами кафедры «Информатика, прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения по заказу ОАО «РЖД» разработана Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов (МАПТЭР) [4], внедренная на сети железных дорог России.

Специфика выполнения анализа использования энергоресурсов на тягу поездов заключается в обработке большого объема статистических данных на разных уровнях управления (эксплуатационное локомотивное депо, железная дорога, сеть железных дорог) отдельно по

видам тяги, видам движения, сериям тягового подвижного состава (ТПС) и направлениям работы в границах участков работы локомотивных бригад. Такая детализация данных определяет целесообразность представления результатов в разных аналитических разрезах с использованием объемных и удельных значений энергетических показателей, а также относительных величин, обеспечивающих эффективную сравнительную оценку выполнения и динамики изменения исследуемых показателей.

Процессы сбора, накопления и хранения разноплановых данных, необходимость оперативного выполнения большого количества трудоемких вычислений требуют современных подходов к организации аналитической работы на всех уровнях управления расходом ТЭР. Применение информационных технологий, накопление банков данных и создание автоматизированных систем их обработки позволяют повысить эффективность принятия управленческих решений.

Полный комплекс расчетов в соответствии с указанной Методикой реализован в специализированной автоматизированной информационной системе (АИС МАПТЭР), структурно-функциональная схема которой представлена на рисунке 1. Модуль анализа АИС МАПТЭР обеспечивает накопление и обработку необходимых статистических данных, а также реализует полный набор функций, направленных на выполнение детального анализа изменения удельного и общего расхода ТЭР тяговым подвижным составом с учетом влияния следующих параметров:

- изменения качественных показателей использования ТПС (средней массы поезда и средней технической скорости в грузовом, пассажирском, пригородном и хозяйственном видах движения; средней нагрузки на ось вагона в грузовом и хозяйственном видах движения; коэффициента участковой скорости и доли порожнего пробега вагонов в грузовом движении);
- перераспределения объемов перевозочной работы по видам движения;
- перераспределения объемов перевозочной работы по направлениям;
- структуры эксплуатируемого парка ТПС;
- времени простоя ТПС в ожидании работы, количества задержек у запрещающего сигнала светофоров, количества неграфиковых остановок, количества случаев проследования мест с ограничением скорости;
- времени нагона опоздания поездов в пассажирском и пригородном видах движения;
- объема энергии рекуперации;
- температуры атмосферного воздуха.



Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема АИС МАПТЭР

Результативность всестороннего анализа тягового энергопотребления определяется качеством, полнотой и оптимальной систематизацией представляемой информации. Объективность анализа расхода ТЭР на тягу поездов в значительной степени зависит от объема накопленной информации в базе данных (БД), насчитывающей более 80 разнородных показателей, требующих различных подходов к их исследованию. Например, на вышестоящих уровнях достаточно хранить только обобщенные показатели, а на линейном уровне потребность в подробной детализации данных по отдельным категориям обусловлена необходимостью оперативного управления процессом энергопотребления и принятия мер для устранения намечающихся негативных тенденций. Для реализации указанных особенностей АИС МАПТЭР должна содержать следующие функции:

контроль достоверности исходных данных, их корректную интеграцию и долговременное хранение в БД в унифицированном виде;

применение универсального механизма доступа к данным на любом иерархическом уровне их анализа с учетом специфики взаимодействия с разноплановыми источниками информации;

создание и поддержку справочно-информационного модуля, обеспечивающего системность данных, согласованность и консолидацию показателей в БД;

формирование запросов и отчетов в точном соответствии с информационными потребностями пользователя при минимизации количества запрашиваемых параметров.

Реализация АИС МАПТЭР основана на принципах модульной и компонентной архитектур программных систем [5], позволяющих упростить процесс модернизации и расширения функциональности системы за счет независимо разрабатываемых функциональных модулей и использования универсальных программных библиотек. Для создания АИС МАПТЭР применялась интегрированная среда разработки Borland Delphi 7.0, инструментарий которой позволяет проектировать визуальную составляющую программного обеспечения при помощи готовых наборов интерактивных компонентов (панелей диалога, форм, кнопок, полос прокрутки и др.). Работа с базой данных АИС МАПТЭР выполняется с помощью СУБД FireBird 2.1 и набора компонентов FIBPlus [6 – 8].

Непременным условием надежного и корректного взаимодействия пользователя и АИС МАПТЭР является наличие эргономичного программного интерфейса. Необходимость обеспечения работоспособности и удобства в эксплуатации АИС МАПТЭР, достижения целевых результатов анализа энергозатрат на тягу поездов на разных уровнях и направлениях исследования определяет ряд требований к программному интерфейсу системы, а именно:

– целевую ориентацию системы, определяющую оптимальный набор задач, которые пользователь решает с помощью системы;

– интуитивность и легкость освоения интерфейса, наличие подробных комментариев;

– прозрачность навигации между блоками и унифицированность элементов интерфейса;

– логически обоснованное разделение функций и адекватное взаимодействие пользователя и системы;

– обеспечение семантической целостности данных для выявления случаев как умышленного, так и непреднамеренного их искажения;

– системность представления и рациональное расположение анализируемых показателей в информационных окнах системы и отчетных формах;

– наличие вспомогательных средств поддержки (нормативно-справочной информации, уведомляющих сообщений, многоуровневой помощи), в том числе принятия решений в неопределенных ситуациях (ввод данных по умолчанию, обход «зависания» процессов и др.);

– наличие эффективных средств поиска, сортировки и выборки информации;

– формирование запросов и создание комбинированных отчетных форм [9] с полным набором взаимосвязанных показателей, отражающих результаты энергопотребления на тягу поездов, с учетом уровня их агрегирования или детализации.

В АИС МАПТЭР реализован графический вид пользовательского интерфейса (ГПИ) типа WIMP [10] (Window – окно, Image – образ, Menu – меню, Pointer – указатель), парадигма которого обеспечивает диалог с пользователем не с помощью команд или текстовых гиперссылок, а посредством графических образов – элементов управления. Такой ГПИ максимально адаптирован для быстрого и эффективного применения всех его функциональных возможностей пользователями разного уровня. ГПИ АИС МАПТЭР построен на компонентах открытого интерфейса программирования приложений Windows API (Application Program Interface), через которые осуществляется запуск программных кодов, реализующих целевые функции системы.

Особенность выполнения анализа на разных организационных уровнях по разным категориям исследования определяет необходимость представления БД АИС МАПТЭР в виде нескольких структурированных таблиц, объединяющих показатели по признакам их взаимосвязей и информационной потребности управления энергопотреблением:

- данные об энергопотреблении и выполненной перевозочной работе;
- показатели использования ТПС;
- непроизводительные затраты ТЭР и техническое состояние ТПС;
- температура атмосферного воздуха и др.

Исходные данные загружаются в АИС МАПТЭР автоматически в виде специализированного макета рабочей книги Excel, унифицированный формат которого обеспечивает инвариантность детализации вводимых данных к разным организационным уровням, корректное объединение информации в БД и системность ее представления. Помимо исходных данных в таблицах БД дополнительно отображаются расчетные показатели (УРЭ и др.), позволяющие оперативно выявить тенденции и причины изменения энергопотребления.

Единая структура представления данных в таблицах, однотипный набор средств визуализации, характеристик и методов их обработки обеспечивают универсальность эксплуатации системы на различных уровнях организационной структуры ОАО «РЖД». Степень детализации представления данных в таблицах определяется категорией пользователя (иерархией структурного подразделения) и реализуется посредством графических форм, обеспечивающих унифицированный доступ и отображение данных БД на любом уровне иерархии. Фактически настройка конфигурации АИС МАПТЭР с целью ее адаптации под особенности работы конкретного пользователя сводится к изменению определенной части информационного обеспечения системы, схема настройки представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема настройки конфигурации АИС МАПТЭР

Для эффективной работы с таблицами в АИС МАПТЭР реализованы режимы многоуровневой сортировки, выборки, поиска информации и др.

Возможность систематизации данных посредством упорядочения их значений в группах значительно упрощает выполнение различных операций. В АИС МАПТЭР реализована функция многоуровневой сортировки, позволяющая выстроить последовательность показателей в нужном порядке. При этом столбцы, входящие в состав ключа сортировки (рисунок 3), отмечаются визуальным указанием порядка сортировки (пиктограммой и порядковым номером). Этот прием облегчает работу с данными, сгруппированными по нескольким показателям, следующим в произвольном порядке или находящимся за пределами видимости экрана. Реализованные возможности систематизации анализируемых показателей позволяют определить функциональные закономерности между показателями, влияющими на расход ТЭР, например, соответствие фактического расхода энергии нормативному;

сравнить плановые и фактические значения расхода энергии для контроля и анализа рациональности энергопотребления;

выявить случаи неэффективного расходования ТЭР;

производить мониторинг ввода недостоверной информации путем оценки граничных значений расхода ТЭР по направлениям анализа.

Большой объем исходных данных делает невозможным выполнение эффективного анализа энергозатрат по различным направлениям (видам ТПС, видам движения и др.) без использования режима фильтрации. С этой целью в АИС МАПТЭР реализована возможность многокритериального отбора информации в зависимости от решаемой задачи. Данный режим представляет собой графический интерпретатор SQL-запросов, основанный на логических правилах «И/ИЛИ» и реализованный в понятных пользователю терминах, что существенно облегчает освоение и дальнейшее применение этого режима. Кроме того, АИС МАПТЭР содержит средства визуальной проверки валидности сформированного пользователем условия запроса, что повышает достоверность получаемых результатов.

Следует отметить, что для удобства работы пользователя параметры, которые задаются в запросах с меньшей частотой (например, период времени, уровень анализа, вид тяги, тип ТПС, признак детализации данных и др.), выделены из общего блока настройки критериев выборки и вынесены в отдельные интерфейсные элементы, позволяющие пользователю вызывать их по мере необходимости. Для просмотра записей, удовлетворяющих определенным условиям, в АИС МАПТЭР реализованы режимы быстрого поиска информации (рисунок 4).

Год	Месяц	День	Дирекция	Направление работы	Тип ТПС
2012	1	0	Дирекция приг. сообщ.	Калининградская	Электропоезд
2012	1	0	Дирекция приг. сообщ.	Западно-Сибирская	Электропоезд
2012	1	0	Дирекция приг. сообщ.	Забайкальская	Электропоезд
2012	1	0	Дирекция приг. сообщ.	Горьковская	Электропоезд
2012	1	0	Дирекция приг. сообщ.	Восточно-Сибирская	Электропоезд
2013	12	0	Дирекция тяги	Южно-Уральская	Электровоз
2013	12	0	Дирекция тяги	Южно-Уральская	Электровоз
2013	12	0	Дирекция тяги	Южно-Уральская	Электровоз
2013	12	0	Дирекция тяги	Южно-Уральская	Электровоз
2013	12	0	Дирекция тяги	Юго-Восточная	Электровоз
2013	12	0	Дирекция тяги	Юго-Восточная	Электровоз

Рисунок 3 – Многоуровневая сортировка данных в АИС МАПТЭР

Поиск

Образец: ВЛ10

Поиск в: Серия ТПС

Совпадение: С любой части поля

Просмотр: Все

С учетом регистра С учетом формата

Найти далее

Закрыть

Рисунок 4 – Вид окна поиска данных в таблице АИС МАПТЭР

Важной составляющей базы данных АИС МАПТЭР являются таблицы-справочники, предназначенные для пояснения и расшифровки показателей, исключения неоднозначности при вводе исходных данных и выполнении расчетов, для обеспечения системности представления результатов в запросах и отчетных формах. Характерной особенностью анализа энергопотребления на различных иерархических уровнях является необходимость значительной детализации информации по основным категориям исследования и обобщения показателей по малодеятельным направлениям работы. Для решения этой задачи при организации нормативно-справочной информации в АИС МАПТЭР предусмотрены специальные поля и признаки, характеризующие значимость категорий анализа. При заполнении соответствующего справочника категории, по которым требуется детализация анализа энергоресурсов (например, основные серии ТПС), отмечаются с помощью общепринятых элементов управления (флажки, переключатели и др.), а невыделенные категории в отчетной форме автоматически объединяются в группу «Прочие», что удобно для уменьшения объема вывода малозначимых данных.

Главная сложность при выполнении анализа энергопотребления заключается в оценке влияния изменения каждого эксплуатационного фактора в отдельности на изменение расхода ТЭР. Влияние таких факторов, как средняя масса поезда и средняя техническая скорость, средняя нагрузка на ось грузового вагона, коэффициент участковой скорости и доля порожнего пробега вагонов, определяется с помощью специальных коэффициентов влияния, расчет которых осуществляется на основе параметров осредненного локомотива и отличается значительной трудоемкостью [4].

Постоянное накопление и обновление данных в БД приводит к тому, что при очередном запуске режима анализа автоматически рассчитываются новые значения коэффициентов влияния. При этом становится затруднительной отдельная оценка степени влияния изменения именно этих коэффициентов и непосредственно изменения показателей перевозочного процесса. Для решения этой проблемы в БД АИС МАПТЭР предусмотрены ввод, хранение и использование в расчетах коэффициентов влияния, заданных вышестоящим подразделением или определенных другими способами, для каждого типа ТПС, что позволяет выполнить оценку изменения расхода ТЭР только за счет изменения значений коэффициентов влияния (рисунок 5). Реализованные в АИС МАПТЭР режимы работы позволяют установить способ применения коэффициентов влияния при анализе (рисунок 6), просматривать их сохраненные в БД значения, при необходимости осуществить новый расчет (например, при изменении исходных данных), а также экспортировать их в электронную таблицу для дальнейшей обработки.

Наименование влияющего фактора	Значения коэффициентов влияния по видам движения, %			
	грузовое	пассажирское	пригородное	хозяйственное
Изменение средней массы поезда на 1 %	-0,1114	-0,1949	0,0000	-0,2834
Изменение средней нагрузки на ось грузового вагона на 1 %	-0,3937			-0,1454
Изменение средней технической скорости на 1 км/ч	0,7551	0,1051	0,0000	0,0867
Изменение коэффициента участковой скорости на 1 %	-0,3564			
Изменение доли порожнего пробега грузовых вагонов на 1 %	0,4576			

Рисунок 5 – Окно работы с коэффициентами влияния

Анализ расхода ТЭР

Отчетный период: начало Октябрь 2015, окончание Декабрь 2015

Базовый период: начало Октябрь 2014, окончание Декабрь 2014

Дирекция: Все дирекции

Вид тяги: ЭТ

Коэффициенты влияния: Рассчитать новые

Анализ относительно пл

Использовать расчетные
Использовать заданные

Расчет Закрыть

Рисунок 6 – Окно выбора параметров для анализа расхода ТЭР

Анализ расхода ТЭР в АИС МАПТЭР выполняется в соответствии с заданными параметрами отбора данных и настройками системы. В результате реализации этого режима формируется отчетный документ в формате Microsoft Excel, который представляет собой набор из 12 структурированных таблиц. В данной отчетной форме использованы анкетный, зональный и табельный способы компоновки показателей, отражающих изменение УРЭ по каждому типу ТПС и направлению исследования (рисунок 7). Каждая таблица выводится с пояснениями, сопровождается необходимыми комментариями и содержит эффективные способы представления результатов, например, условное форматирование, задающее стиль оформления ячеек в соответствии с их значениями. Такая форма представления результатов особенно удобна для анализа конкретной группы связанных между собой показателей. Дополнительно выводятся итоговые результаты по каждому типу ТПС и обобщенные данные в целом по виду тяги. Отдельно выводятся результаты расчета параметров осредненного локомотива, с учетом которых определены коэффициенты влияния (рисунок 8).

Наименование показателя	Вид движения	Изменение показателя		Коэффициент влияния, %	Изменение удельного расхода ТЭР, кВт·ч/10 тыс. т·км брутто
		абсолютное, ед. изм.	относительное, %		
Средняя масса поезда, т	Грузовое	38,00	1,131	-0,1731	-0,208
	Пассаж. дальн.	5,00	0,624	-0,2961	-0,004
	Хозяйственное	148,00	41,690	-0,6013	-3,349
Средняя нагрузка на ось вагона, т	Грузовое	0,09	0,630	-0,2684	-0,179
	Хозяйственное	2,42	20,898	0,0048	0,013
Средняя техническая скорость, км/ч	Грузовое	1,27	2,725	0,3946	0,532
	Пассаж. дальн.	-1,03	-1,570	0,4767	-0,010
	Хозяйственное	3,64	7,845	-1,3297	-0,647
Коэффициент участковой скорости, %	Грузовое	0,61	0,891	-0,2687	-0,174
Доля порожнего пробега вагонов, %	Грузовое	-0,49	-1,054	1,7451	-0,908
Итого					-4,933

Примечание. Коэффициенты влияния рассчитаны заново.

Вид движения	УРЭ в базовом периоде, кВт·ч/10 тыс. т·км брутто	Доля работы за период, %		Изменение доли работы, %	Изменение удельного расхода ТЭР, кВт·ч/10 тыс. т·км брутто
		базовый	отчетный		
Грузовое	111,2	86,2	95,5	9,3	10,337
Пассаж. дальн.	161,8	13,5	1,3	-12,2	-19,690
Хозяйственное	410,2	0,4	3,3	2,9	11,794
Итого					2,441

Рисунок 7 – Таблицы результатов расчета изменения УРЭ

Структурное подразделение: N					
Отчетный период: 05.2016 - 05.2016					
Базовый период: 05.2015 - 05.2015					
Дирекция: D					
Вид тяги: ЭТ					
Тип ТПС: Электровоз					
Вид движения: Грузовое					
№ строки	Наименование показателя	23С4К	ВЛ10	ВЛ8	ВЛ6
1	Доля работы локомотивов (МВПС) соответствующей серии в общей работе ТПС по виду движения, %	4,9	0,0		
2	Сцепной вес локомотива, т	192	184		
3	Номинальный КПД локомотива (МВПС)	0,880	0,902		
4	Номинальная касательная мощность локомотива (МВПС), кВт	5 735	4 600		
5	Коэффициент, характеризующий относительный расход ТЭР на холостом ходу	0,0145	0,0134		
Вид движения: Пассаж. дальн.					
№ строки	Наименование показателя	23С4К	ВЛ60К	ВЛ8	ВЛ6
1	Доля работы локомотивов (МВПС) соответствующей серии в общей работе ТПС по виду движения, %	8,4	0,0		
2	Сцепной вес локомотива, т	192	140		
3	Номинальный КПД локомотива (МВПС)	0,880	0,840		
4	Номинальная касательная мощность локомотива (МВПС), кВт	5 735	4 050		
5	Коэффициент, характеризующий относительный расход ТЭР на холостом ходу	0,0145	0,0110		

Рисунок 8 – Таблицы результатов расчета параметров осредненного локомотива

Перечисленные режимы работы АИС МАПТЭР отражают функциональные возможности системы и характеризуют следующие подходы к построению ее ГПИ:

- 1) совместимость и взаимодействие всех программных компонентов системы;
- 2) унифицированная методология работы с объектами системы с помощью информационных окон;
- 3) представление объектов системы в табличной форме с возможностью поиска, выборки и настройки отображения столбцов, упорядоченных по соответствующим признакам;
- 4) осуществление всех действий иницирующего характера с объектами на глобальном уровне пользовательского интерфейса с помощью системы команд меню, разделенных на группы в соответствии с их функциональным назначением, на локальном уровне – посредством функциональных опций и изменения их параметров.

Реализованные в АИС МАПТЭР инструментальные средства и удобство пользовательского интерфейса обеспечивают решение задачи всестороннего анализа энергозатрат на тягу поездов как одного из основных элементов системы управления расходом ТЭР на выполнение перевозочного процесса. Эргономичный интерфейс системы дает возможность в полной мере выполнять стандартные операции поиска, сортировки, выборки информации в разных режимах, производить первичный анализ данных, формировать разнообразные запросы и отчеты, что в конечном итоге способствует повышению эффективности выполнения анализа тягового энергопотребления.

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 14.12.2016 № 2537 р. / ОАО «РЖД». – М. 2016.
2. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание [Текст] / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др.; Под ред. В. А. Гапановича. – М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2014. – 304 с.
3. Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Improvement of traction rolling stock energy efficiency analysis system // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2017): International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT, 2017, pp. 48 – 58.
4. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 № 512 // ОАО «РЖД». – М. 2014.
5. Назаров, С. В. Архитектуры и проектирование программных систем: Монография [Текст] / С. В. Назаров. – М.: Инфра-М, 2013. – 413 с.
6. Искрин, В. В. Проектирование базы данных программного комплекса анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов [Текст] / В. В. Искрин // Международная науч.-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, на транспорте, производстве и образовании'2009»: Сб. трудов.. – Одесса: Научный мир. 2009. – С. 51 – 54.
7. Хомоненко, А. Д. Delphi 7 [Текст] / А. Д. Хомоненко, В. Гофман, Е. Мещеряков. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 1136 с.
8. Борри Х.. Firebird: Руководство разработчика баз данных: Пер. с англ. [Текст] / Х. Борри. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 1104 с.
9. Давыдов, А. И. Совершенствование системы статистической отчетности об энергопотреблении на тягу поездов [Текст] / А. И. Давыдов // Сборник научных трудов SWorld. – 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 30 – 31.
10. Рагулин, П. Г. Информационные технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/007/41007/18312?p_page=12 (дата обращения: 05.12.2018).

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* (The energy strategy of the Russian Railways holding company for the period up to 2020 and for the future until 2030), Moscow, ОАО «RZhD», 14.12.2016, no. 2537r.
2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Ivanov B. I. [i dr.]. *Energoberezhniye na zheleznodorozhnom transporte: Spravochno-metodicheskoye izdaniye* (Energy saving in railway transport: Reference and methodical publication) Moscow: «Intekhenergo-Izdat». «Teploenergetik», 2014, 304 p.
3. Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Improvement of traction rolling stock energy efficiency analysis system. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport (EMMFT 2017)* (International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT). – Khabarovsk, 2017, pp 48 – 58.
4. *Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poyezdov* (Methods for analyzing and forecasting the consumption of fuel and energy resources for traction of trains), Moscow, ОАО «RZhD», 26.12.2014, no. 512.
5. Nazarov S. V. *Arkhitektury i proyektirovaniye programnykh sistem: monografiya* (Architecture and software systems design: monograph). Moscow: INFRA-M, 2013, 413 p.
6. Iskrin V. V. Designing a database of a program complex for analyzing the consumption of fuel and energy resources for train traction [Proyektirovaniye bazy dannykh programmogo kompleksa analiza raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov na tyagu poyezdov]. *Sb. trudov*

Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. «Sovremennyye problemy i puti ikh resheniya v nauke. transporte. proizvodstve i obrazovanii'2009» (International Scientific and Practical University. conf. "Current problems and their solutions in science, transport, production and education'2009"). – Odessa, 2009, pp. 51 – 54.

7. Khomonenko A. D., Gofman V., Meshcheryakov E. *Delphi 7* (Delphi 7). Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2010, 1136 p.

8. Khelen Borri. *Firebird: rukovodstvo razrabotchika baz dannykh* (Firebird: Database Developer's Guide). – Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 1104 p.

9. Davydov A. I. Improving the system of statistical reporting on energy consumption for train traction [Sovershenstvovaniye sistemy statisticheskoy otchetnosti ob energopotreblenii na tyagu poyezdov]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* (Collection of SWorld). – Ivanovo, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 30 – 31.

10. Ragulin P. G. *Informatsionnye tekhnologii* (Information technologies), http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/007/41007/18312?p_page=12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидорова Елена Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующая кафедрой «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: armsid@mail.ru

Железняк Светлана Петровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: zhsp120866@yandex.ru

Подгорная Светлана Олеговна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидорова, Е. А. Управление энергопотреблением на тягу поездов за счет повышения эффективности функционирования автоматизированной системы обработки информации об энергозатратах локомотивов [Текст] / Е. А. Сидорова, С. П. Железняк, С. О. Подгорная // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4(36). – С. 142 – 150.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorova Elena Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: armsid@mail.ru

Zheleznyak Svetlana Petrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: zhsp120866@yandex.ru

Podgornaya Svetlana Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Teacher of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorova E. A., Zheleznyak S. P., Podgornaya S. O. Energy consumption control for train traction by improving the efficiency of the automated system for processing information about the energy consumption of locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 4, no 36, pp. 142 – 150 (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 представляются:

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»

№ 4 (36) 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 20.12.2018.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 20.12.2018.

