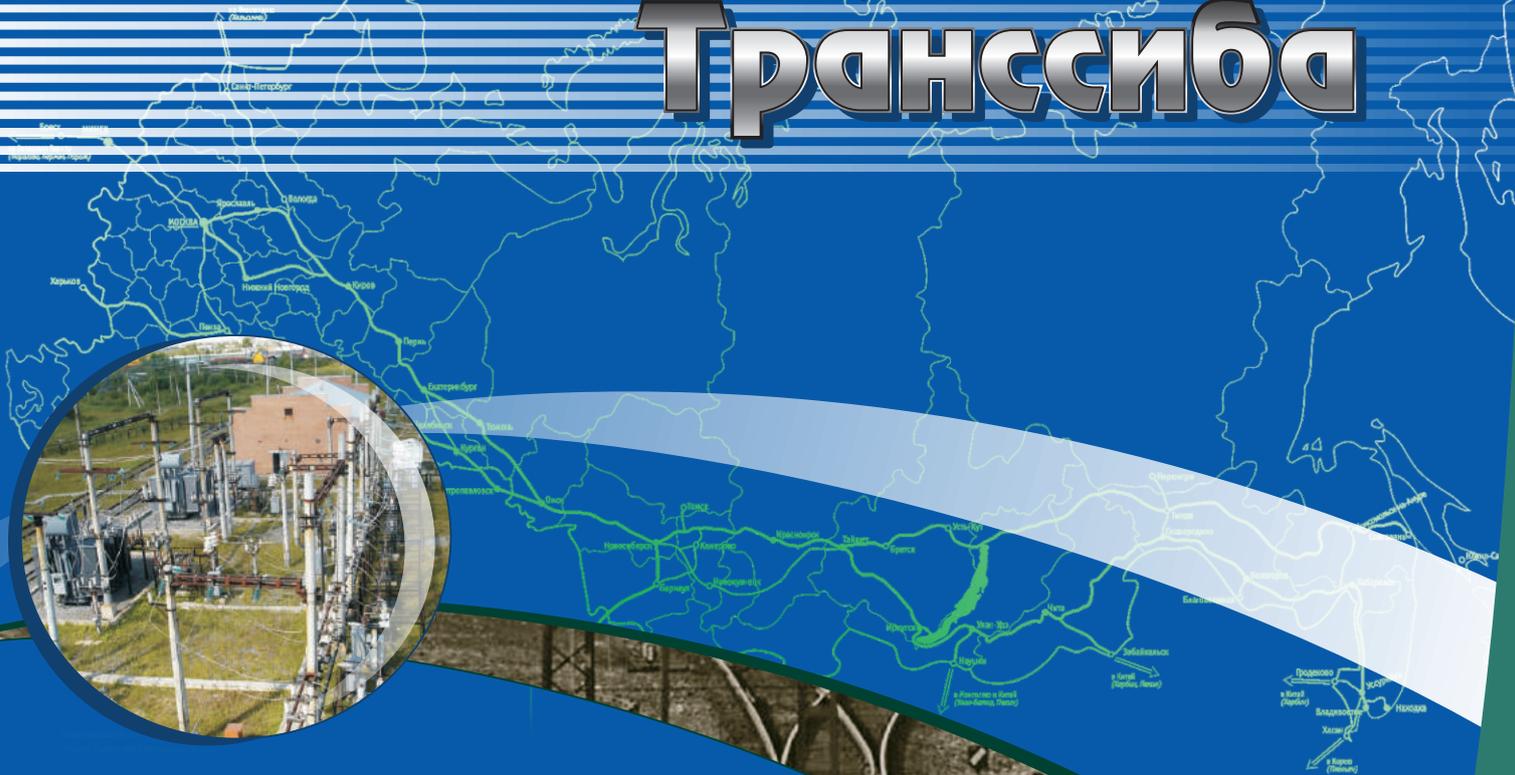


# ИЗВЕСТИЯ

№ 1(29)

2017

# 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** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. **Демин Юрий Васильевич** – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТ, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. **Каргапольцев Сергей Константинович** – первый проректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
9. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
10. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
11. **Сидоров Олег Алексеевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
12. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
13. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
14. **Харламов Виктор Васильевич** – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

## EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Cheremisin Vasily Titovich** – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. **Bokaryov Sergey Alexandrovich** – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. **Demin Yuriy Vasilyevich** – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. **Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich** – vice-rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
9. **Kosarev Alexander Borisovich** – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
10. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
11. **Sidorov Oleg Alexeevich** – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
12. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
13. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
14. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог

- Лунев С. А., Сероштанов С. С., Присухина И. В., Ходкевич А. Г. Непрерывная оценка состояния обратной тяговой рельсовой сети в условиях организации тяжеловесного движения ..... 2
- Молчанов В. В., Носков В. О., Четвергов В. А., Чулков А. В. Моделирование процесса технической эксплуатации и формирования режимов нагрузки и прогрева дизель-генераторных установок тепловозов ..... 9
- Николаев В. А. Оценка влияния параметров рессорного подвешивания грузового вагона на показатели его динамических качеств и безопасности движения ..... 17
- Овчаренко С. М., Балагин О. В., Балагин Д. В. Повышение эффективности работы системы охлаждения тепловозов в эксплуатации ..... 27
- Плакин А. В., Швецов С. В. Пути снижения расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог ..... 35
- Харламов В. В., Попов Д. И., Байсадыков М. Ф. Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей ..... 47

### Транспортная энергетика

- Авдеева К. В., Медведева А. А., Уткина А. В. Автоматическая дренажная установка ..... 56
- Истомин С. Г. Апробация метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги ..... 64
- Никифоров М. М., Вильгельм А. С., Гутников В. И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации ..... 74
- Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Незевак В. Л. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения ..... 83

### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Борисенко Д. В., Осин В. А. Практический подход к изучению микропроцессорных систем интервального регулирования движения поездов ..... 90
- Кандаев В. А., Леденев М. А., Пономарев А. В. Программный модуль формирования панорамного изображения внутренней поверхности подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и анализа распознанных неоднородностей ..... 99

### Путь и искусственные сооружения

- Дороган А. С. Ретроспектива вантово-висячих мостов повышенной аэродинамической устойчивости ..... 105
- Эргашев У. Э., Бегматов Н. И. Способ обеспечения отвода ширины колеи в кривых радиусом менее 350 м ..... 112

### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Покровская О. Д. Моделирование системы организации перевозочного процесса через терминальную сеть ..... 118
- Соколов М. М. Визуализация изменения параметров линейных трансформаторов в системах железнодорожной автоматики и телемеханики ..... 130

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 621.332.23:625.14:656.25:517.54

С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, И. В. Присухина, А. Г. Ходкевич

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

## НЕПРЕРЫВНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОБРАТНОЙ ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы, связанные с повышением устойчивости работы рельсовых цепей в условиях тяжеловесного движения для участков с электротягой переменного тока. Построен график координатной плоскости основных диагностических состояний рельсовой сети. Выполнен анализ полученных результатов и предложен алгоритм действий по определению значений координаты положения шунта и сопротивления изоляции рельсовой сети по графику координатной плоскости.

**Ключевые слова:** тяговая рельсовая сеть, рельсовая цепь, рельсовая линия, обратный тяговый ток, тяжеловесное движение, конформное отображение, функции комплексного переменного, координатная плоскость, координата положения шунта, сопротивление изоляции, динамические параметры, диагностическое состояние.

Sergey A. Lunev, Sergey S. Seroshtanov, Iлона V. Prisukhina, Anton G. Hodkevich

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

## THE UNINTERRUPTED STATE EVALUATION OF BACKWARD TRACTION CIRCUIT IN HEAVYWEIGHT TRAFFIC CONDITIONS

**Abstract.** In the article there is the increase of rail circuits work stability in conditions of heavyweight traffic for AC traction sections. There is a coordinate plane graph of backward traction circuit base diagnostic states in the paper. We analyzed the results gained in the researching and suggested the way to coordinate rail shunt location and to evaluate the insulation resistance in backward traction circuit.

**Keywords:** backward traction circuit, track circuit, rail line, backward traction AC, heavyweight traffic conditions, conformal mapping, function of a complex variable, coordinate plane, rail shunt location, insulation resistance, dynamic parameters, diagnostic condition.

Одним из принципиально важных и актуальных направлений стратегической программы развития ОАО «Российские железные дороги» является увеличение пропускной и провозной способности участков железных дорог, которое может быть реализовано применением на сети тяжеловесного движения.

Тяжеловесное движение оказывает непосредственное влияние на рельсовую линию и подключаемые к ней устройства, которые, с одной стороны, являются объектами системы тягового электроснабжения, реализуя непрерывную рельсовую сеть для канализации обратного тягового тока (КОТТ), а с другой стороны – объектом инфраструктуры хозяйства автоматики и телемеханики в составе рельсовых цепей, выполняющих функции первичного путевого датчика информации о состоянии рельсового пути (рисунок 1).

Обеспечение надежного и безопасного функционирования рельсовых цепей при реализации тяжеловесного движения невозможно без выполнения нормативных требований к построению схем КОТТ. Нарушение требований может повлечь за собой невыполнение условий контрольного режима работы рельсовой цепи. На выполнение нормативных требований оказывают неблагоприятное влияние такие факторы, как излом или изъятие рельса, изъятие дроссель-трансформатора, обрыв междроссельной или междупутной перемычки, выход из строя стыкового соединителя, асимметрия обратного тягового тока, замыкание изостыков колесными парами. Данные факторы (далее – динамические параметры в рельсовой сети) влияют как на работу системы КОТТ в целом, так и на функционирование отдельных рельсовых цепей (РЦ) [1, 2].

Следует отметить, что РЦ свойственно наличие таких недостатков:

- дискретная информация о свободности и исправности рельсовой цепи;
- отсутствие информации о фактическом техническом состоянии РЦ и ее элементов, в том числе рельсовой линии (РЛ);
- отсутствие фиксации предотказных ситуаций;
- невозможность определения фактической координаты местоположения подвижной единицы на рельсовой линии;
- неразличимость состояний занятия рельсовой цепи и ее неисправности.

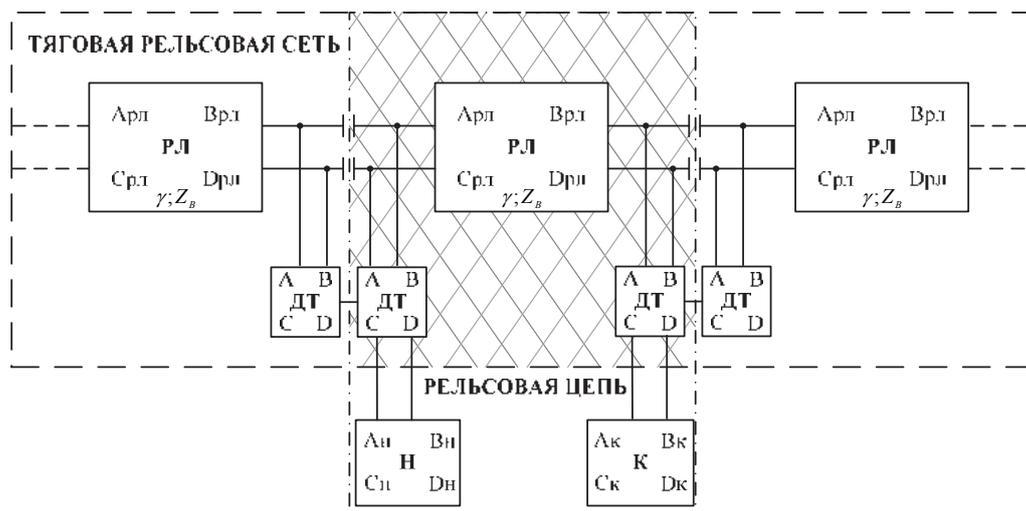


Рисунок 1 – Структура обратной тяговой рельсовой сети в сочетании с аппаратурой отдельной рельсовой цепи: РЛ – рельсовая линия; ДТ – дроссель-трансформатор; Н – четырехполюсник начала, замещающий аппаратуру питающего конца РЦ; К – четырехполюсник конца, замещающий аппаратуру релейного конца РЦ

Кроме того, такой параметр рельсовых линий, как сопротивление изоляции, может варьироваться в широких пределах.

Таким образом, задача непрерывной оценки и анализа состояния обратной тяговой рельсовой сети (ОТРС) является необходимым условием реализации тяжеловесного движения. Для решения этой задачи необходим комплексный анализ исправного состояния, безопасного функционирования, распространения сигнала по рельсовым линиям в условиях влияния множества факторов, изменяющихся с течением времени.

Все изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что оценка состояния ОТРС является нетривиальной задачей и требует для своего решения построения виртуальной модели рельсовой цепи.

В качестве математического аппарата для непрерывного диагностирования состояния ОТРС авторами предлагается использование аппарата конформных отображений [3, 4].

Для анализа основных диагностических состояний ОТРС необходимо рассмотреть схему замещения рельсовой линии с рассредоточенными параметрами (см. рисунок 1). Параметры четырехполюсника рельсовой линии можно выразить через ее вторичные параметры (1):

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch \gamma l_p & Z_b \cdot sh \gamma l_p \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh \gamma l_p & ch \gamma l_p \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $Z_b$  – волновое сопротивление рельсовой линии, Ом;

$\gamma$  – коэффициент распространения волны, 1/км;

$l_p$  – длина рельсовой линии, км.

Волновое сопротивление линии и коэффициент распространения, в свою очередь, определяются по следующим формулам:

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{Z_{\text{п}} \cdot r_{\text{и}}}; \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_{\text{п}}}{r_{\text{и}}}}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{п}}$  – удельное сопротивление рельсовой петли переменному току, Ом/км;

$r_{\text{и}}$  – сопротивление изоляции рельсовой линии, Ом·км.

Рассмотрим конформное преобразование комплексного сопротивления нагрузки во входное для рельсового четырехполюсника. Все сложные преобразования областей в электротехнике основаны на существовании трех простейших отображений – растяжения, сдвига и инверсии. В работе [3] доказывается, что любой четырехполюсник рельсовой линии при  $C \neq 0$  можно представить в виде цепочки четырех элементарных четырехполюсников (4):

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_0'' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & \frac{1}{K} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & Z_0'' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Этот четырехполюсник соответствует следующим преобразованиям:

1) сдвиг области на комплексной плоскости (рисунок 2, а)

$$Z_0'' = \frac{D}{C}. \quad (5)$$

Комплексный сдвиг области на вектор  $Z_0''$  осуществляет параллельный перенос области на комплексной плоскости на величину  $|Z_0''|$  и по направлению аргумента  $\tau$ , где  $Z_0'' = |Z_0''| \cdot e^{j\tau}$ ;

2) антиинверсия на комплексной плоскости, при которой конформное отображение реализуется последовательным выполнением двух инверсий, первая из которых осуществляется относительно единичной окружности  $\Gamma$ , а вторая отражает полученную область симметрично относительно оси  $Im$  (рисунок 2, б);

3) растяжение в  $|K|^2$  и поворота на угол  $2\varphi$ , где  $K = |K| \cdot e^{j\varphi} = \frac{1}{C}$  (рисунок 2, в).

Комплексное растяжение осуществляет растяжение (или сжатие, если  $K < 1$ ) области в  $|K|^2$  раз. Это преобразование называется гомотетией с коэффициентом  $|K|^2$ . Далее осуществляется поворот вокруг начала координат на угол  $2\varphi$ .

Согласно утверждению работ [5, 6] результатом конформного преобразования прямой вида

$$\text{Re}(\lambda Z) = \alpha \quad (6)$$

является окружность с центром в точке

$$w_0 = \frac{2\alpha\overline{AC} + A\overline{D}\lambda + B\overline{C}\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\text{Re}(C\overline{D}\lambda)} \quad (7)$$

и радиусом

$$\rho = \left| \frac{(AD - BC)\lambda}{2\alpha |C|^2 + 2 \operatorname{Re}(C\overline{D\lambda})} \right|, \quad (8)$$

где  $A, B, C, D$  – коэффициенты рельсового четырехполюсника;

$\alpha, \lambda$  – коэффициенты;

$\overline{B}, \overline{C}, \overline{D}, \overline{\lambda}$  – сопряженные комплексные величины.

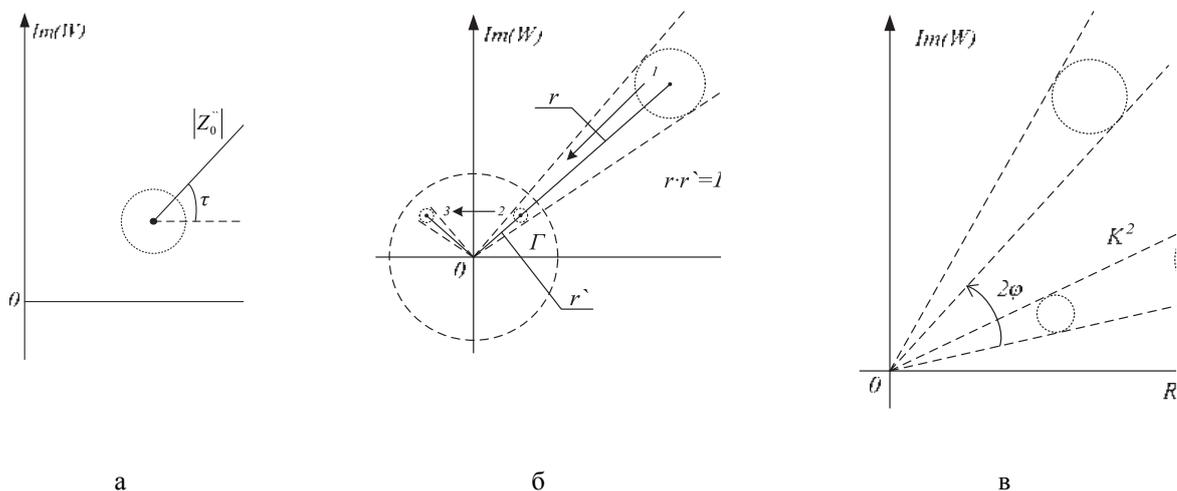


Рисунок 2 – Конформные преобразования областей в электротехнике:  
 а – сдвиг области на комплексной плоскости; б – антиинверсия на комплексной плоскости;  
 в – преобразования типов «растяжение» и «поворот»

В качестве примера рассмотрим определение поперечной неоднородности рельсовой линии (далее – наложение шунта на рельсовую линию), которое дает возможность установить координату местонахождения РЛ. Построение областей на комплексной плоскости производится в соответствии с преобразованиями (4) – (8). Однако для получения графика зависимости комплексного входного сопротивления рельсовой линии  $W_b$  (диагностических состояний рельсовой сети) в качестве нагрузки четырехполюсника рельсовой линии учитываются входные сопротивления смежной рельсовой линии и аппаратуры релейного конца рельсовой цепи [7, 8].

Построение графика выполним для нескольких значений сопротивления изоляции (0,5; 1; 2,5; 5; 7,5 и 10 Ом·км) при нормативном значении сопротивления шунта  $R_{ш} = 0,06$  Ом, в зависимости от координаты его положения с дискретностью 12,5 м. На рисунке 3 представлен график полученной координатной плоскости, на котором продольные линии представляют собой значения сопротивления изоляции, а поперечные линии, которые их пересекают, – значение координаты положения шунта.

График можно условно разделить на две области:

положение шунта в области от 0 до 125 м от начала рельсовой линии. В этой области изменение изоляции не влияет на значение входного комплексного сопротивления при одинаковой координате положения шунта на рельсовой линии;

положение шунта в области от 125 до 625 м от начала рельсовой линии. В этой области изменение сопротивления изоляции существенно влияет на значение входного комплексного сопротивления (при одинаковой координате положения шунта на рельсовой линии). Продольные линии становятся различимыми на данном графике, т. е. по значению входного комплексного сопротивления можно определить не только координату положения нормативного шунта, но и значение сопротивления изоляции рельсовой линии.

Определение координаты происходит путем вычисления фактического комплексного входного сопротивления рельсовой линии и сравнения его активной и реактивной составляющих с расчетными данными, полученными в результате математического моделирования.

Для определения значения входного сопротивления используется соотношение:

$$R = \frac{U}{I} \cdot e^{\left(\frac{180-\varphi^1}{180} \cdot \pi\right)}, \quad (9)$$

где  $U$  и  $I$  – значения напряжения и тока на входе рельсовой линии;  
 $\varphi^1$  – значение фазы между током и напряжением.

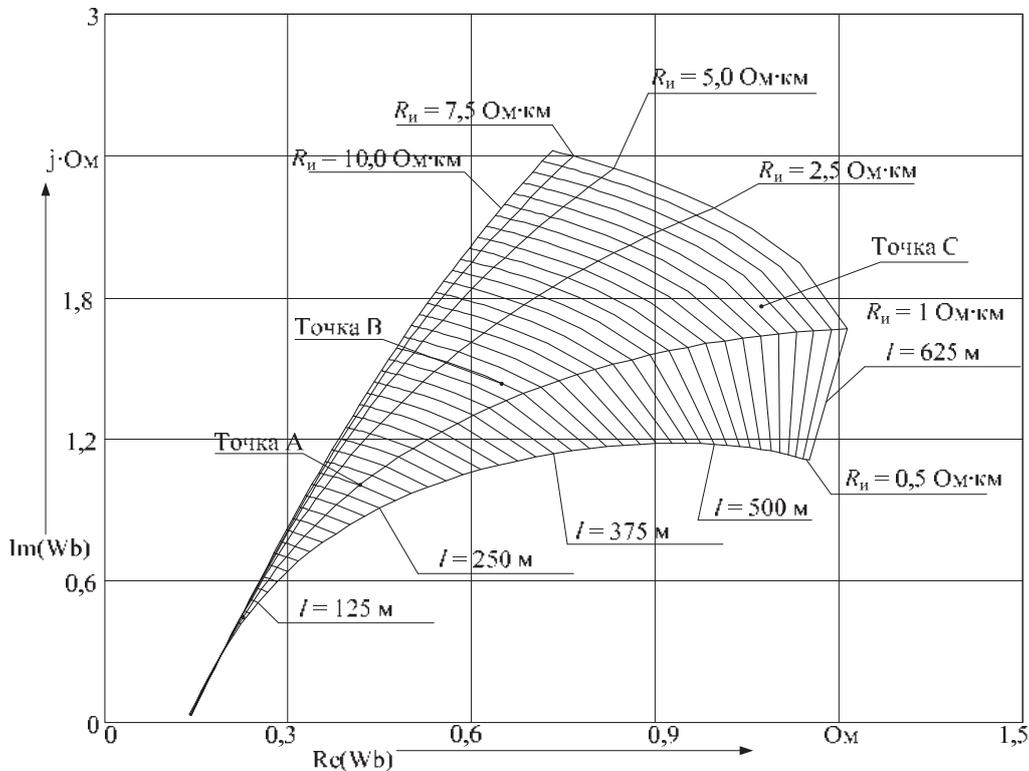


Рисунок 3 – График координатной плоскости основных диагностических состояний рельсовой сети

После определения входного сопротивления (по соотношению (9)) переносим полученные значения точек (А, В и С) на координатную плоскость основных диагностических состояний рельсовой сети (см. рисунок 3).

Проанализируем местоположение каждой точки на графике.

Местоположение точки А совпадает с пересечением продольной (значение сопротивления изоляции  $R_{и} = 1$  Ом·км) и поперечной (значение координаты положения шунта на рельсовой линии  $l = 262,5$  м) линий. Это позволяет однозначно определить координату места положения шунта и текущее сопротивление изоляции рельсовой линии, не прибегая к дополнительным методам уточнения.

Местоположение точки В совпадает со значением комплексного сопротивления соответствующего координате места положения шунта на рельсовой линии  $l = 400$  м. Тем не менее для данной точки определить однозначно сопротивление изоляции рельсовой сети без дополнительных методов уточнения невозможно. Поэтому для упрощения процедуры анализа предлагается определять наименьшее расстояние от точки В до ближайших продольных линий на координатной плоскости с применением метода сравнения получившихся длин. По наименьшей длине определяется принадлежность полученной точки к значению сопротивления изоляции (в данном случае  $R_{и} = 1$  Ом·км). Для уменьшения погрешности определения предлагается увеличить количество продольных линий сопротивления изоляции, уменьшив шаг дискретизации до 0,1 Ом·км.

Местоположение точки С не совпадает ни с одной из построенных на координатной плоскости линий (см. рисунок 3). В этом случае расчет будет производиться аналогично

предыдущему. По наименьшей длине определяется принадлежность точки  $C$  к значениям сопротивления изоляции и координаты места положения шунта (рисунок 4).

На рисунке 4 из точки  $C$  опущены перпендикуляры до ближайших поперечных (значения координаты места положения шунта  $l = 575$  и  $587,5$  м) и продольных (сопротивление изоляции рельсовой сети  $R_{и} = 1$  и  $2,5$  Ом·км) линий. Применяв метод сравнения, получим значения координаты места положения шунта ( $l = 587,5$  м) и текущего сопротивления изоляции рельсовой сети ( $R_{и} = 1$  Ом·км).

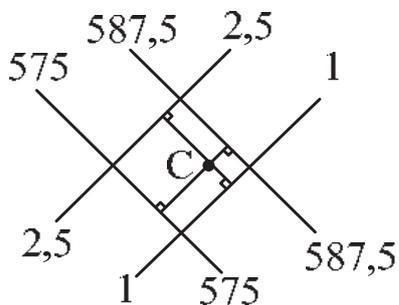


Рисунок 4 – Определение значений координаты и сопротивления изоляции для точки на координатной плоскости

Представленные выше материалы легли в основу заявок на получение правоохранных документов – патентов на изобретения: «Классификатор технического состояния электрической системы пропуска обратного тягового тока» и «Рельсовая цепь» [9, 10].

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Графическое изображение может быть использовано как наглядное средство исследования функциональных зависимостей входных электрических параметров рельсовой сети от ее внутренних (проводимость изоляции, изменение сопротивления

токопроводящих и изолирующих стыков) и внешних (помехи от электрического тягового подвижного состава, линий электропередач) параметров в широком диапазоне их изменения.

2. Геометрическое представление комплексной величины входного сопротивления, отражающее состояние рельсовой сети, позволяет определить на координатной плоскости ее динамические параметры и помочь в определении предотказных ситуаций.

3. Дискретизация в построении координатной плоскости по продольным (сопротивление изоляции) и поперечным (координата положения шунта) линиям зависит от необходимой точности при определении их значений методом сравнения получившихся длин.

4. Применение визуализации результатов измеренного входного комплексного сопротивления рельсовой цепи на координатной плоскости дает возможность непрерывно в реальном времени определить фактическое техническое состояние РЦ (свободность, занятость, характер и место неисправности), фиксировать предотказные ситуации, определять реальные координаты местоположения подвижных единиц на рельсовой линии.

5. Выявление предотказных состояний ОТПС повышает готовность инфраструктуры к реализации тяжеловесного движения.

## Список литературы

1. Лунев, С. А. В рамках организации тяжеловесного движения [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 62, 63.
2. Аюпов, Р. Ш. Мониторинг динамических параметров обратной тяговой рельсовой сети [Текст] / Аюпов Р. Ш., Лунев С. А., Сероштанов С. С. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2008. – № 4 (19). – С. 74 – 76.
3. Сероштанов, С. С. Диагностирование технического состояния тональных рельсовых цепей: Монография [Текст] / С. С. Сероштанов // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Сербрjúк, 2011. – 135 с.
4. Сероштанов, С. С. Применение математического аппарата конформных отображений для непрерывного контроля и прогнозирования состояния тональных рельсовых цепей [Текст] / С. С. Сероштанов, С. А. Лунев // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2006. – № 9 (46). – С. 98 – 102.
5. Шабат, Б. В. Введение в комплексный анализ [Текст] / Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Лаврентьев, М. А. Методы теории функции комплексного переменного [Текст] / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1987. – 688 с.

7. Применение аппарата конформных отображений для непрерывного контроля координаты подвижной единицы на пути [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 1 (17). – С. 88 – 94.

8. Лунев, С. А. Непрерывный контроль координаты и скорости перемещения отцепов в подгорочных парках сортировочных горок [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 3 (19). – С. 104 – 109.

9. Пат. 2423714 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/02, В 60 L 15/00. Классификатор технического состояния электрической системы пропуска обратного тягового тока [Текст] / Аюпов Р. Ш., Лунев С. А., Сероштанов С. С., Соколов М. М.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2010102758/28; заявл. 27.01.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19.

10. Пат. 2505443 Российская Федерация, МПК В 61 L 23/16. Рельсовая цепь [Текст] / Лунев С. А., Сероштанов С. С., Соколов М. М.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2012109352/11; заявл. 12.03.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3.

## References

1. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Hodkevich A. G. To assist heavy haulage. [V ramkakh organizatsii tiazhelovesnogo dvizheniia], *Zheleznodorozhnyi transport – The railway transport*, 2015, no. 11, pp 62 – 63.

2. Aupov R. S., Lunev S. A., Seroshtanov S. S. Monitoring of dynamic parameters of reverse traction railway network [Monitoring dinamicheskikh parametrov obratnoi tiagovoi rel'sovoi seti], *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2008, no. 4, pp. 74 – 76.

3. Seroshtanov S. S. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya tonal'nyh rel'sovyh cepej* (Diagnosing the technical condition of tonal track circuits). Sarbryúk: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 135 p.

4. Seroshtanov S. S., Lunev S. A. The application of the mathematical apparatus of conformal mappings for the continuous monitoring and prediction of the state of the tonal rail circuits [Primenenie matematicheskogo apparata konformnykh otobrazhenij dlya nepreryvnogo kontrolya i prognozirovaniya sostoyaniya tonal'nyh rel'sovyh cepej] *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 9 (46), pp. 98 – 102.

5. Shabat B. V. *Vvedenie v kompleksnyi analiz* (Introduction to complex analysis), Moscow: Science, 1969, 576 p.

6. Lavrentiev M. A. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* (Methods of the theory of complex variable functions), Moscow: Science, 1987, 688 p.

7. Lunev S. A. Application of the apparatus of conformal mappings for continuous monitoring coordinates rolling stock on the railway [Primenenie apparata konformnykh otobrazhenii dlia nepreryvnogo kontrolya koordinaty podvizhnoi edinitsy na puti]. *Izvesyia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1 (17), 88 – 94 pp.

8. Lunev S.A. Continuous monitoring of the position and movement Unhook speed podgorochnykh parks marshalling yards [Nepreryvnyi kontrol' koordinaty i skorosti peremeshcheniia ottsepov v podgorochnykh parkakh sortirovochnykh gorok]. *Izvesyia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (19), 104 – 109 pp.

9. Aupov R. S., Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M. *Patent RU 2423714 G 01, B 60*, 10.07.2011.

10. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M. *Patent RU 2505443 B 61*, 27.01.2014.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лунев Сергей Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Lunev Sergey Aleksandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Кандидат технических наук, первый проректор университета, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-00.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

## **Сероштанов Сергей Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-72.

E-mail: seroshtanovss@mail.ru

## **Присухина Илона Вадимовна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС

Тел.: (3812) 56-26-64.

E-mail: PrisukhinaIV@omgups.ru

## **Ходкевич Антон Геннадьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, декан заочного факультета университета, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-72.

E-mail: HodkevichAG@omgups.ru

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ**

Лунев, С. А. Непрерывная оценка состояния обратной тяговой рельсовой сети в условиях организации тяжеловесного движения [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, И. В. Присухина, А. Г. Ходкевич // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 2 – 9.

Candidate of Technical Sciences, first vice-rector of the university, head of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-00.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

## **Seroshtanov Sergey Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-72.

E-mail: seroshtanovss@mail.ru

## **Prisukhina Iлона Vadimovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Automation and telemechanics», OSTU.

Phone: (3812) 56-26-64.

E-mail: PrisukhinaIV@omgups.ru

## **Hodkevich Anton Gennadievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, the head of Correspondence faculty, senior lecturer of the department "Automation and telemechanics", OSTU.

Phone: (3812) 31-18-72.

E-mail: HodkevichAG@omgups.ru

## **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Prisukhina I. V., Hodkevich A. G. The uninterrupted state evaluation of backward traction circuit in heavyweight traffic conditions. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 2 – 9. (In Russian).

УДК 629.424.001.57

**В. В. Молчанов, В. О. Носков, В. А. Четвергов, А. В. Чулков**

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ И ПРОГРЕВА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЗОВ**

*Аннотация.* В статье на основе анализа экспериментальных данных параметров в режиме реальной эксплуатации тепловоза составлена математическая модель. Представленная математическая модель описыва-

ет техническое состояние локомотива, оценивает его параметры и характеристики, позволяет оценить техническое состояние, режимы работы, расход топлива ДГУ тепловозов. Знание режимов работы дизель-генераторных установок тепловозов в поездной работе является исходным материалом для анализа технических характеристик силового оборудования локомотивов и выработки рекомендаций по их оптимизации применительно к условиям эксплуатации.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, техническое состояние, техническая эксплуатация, вероятностно-статистический метод, расход топлива, объект эксплуатации.

**Viktor V. Molchanov, Vitalii O. Noskov, Vitalii A. Chetvergov, Alexey V. Chulkov**

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

## MODELINY OF TECHNICAL OPERATION PROCESS AND FORMATION OF LOAD CONDITION AND HEATIND OF DIESEL GENERATION SETS

**Abstract.** On the basis of experimental data thereis a mathematical model in thisarticle. Its made from the registration options in acfual operation mode of the locomotive. This mathematical model describes the technical condition of the locomotive and evaluates the parameters and characteristics. Considerable attention is paid to complex state operation of the facility. In dealing with the mathhematical model it's defined the main locomotive operation indicator.

**Keywords:** diesel engine, technical condition, technical operation, probability-statistic method, fuel consumption, an object of exploitation.

Параметры, характеризующие условия эксплуатации, техническое состояние тепловозов и режимы их работы, зависят от многочисленных, иногда трудноконтролируемых факторов. Поэтому получение математического описания основных закономерностей, связанных с функционированием тепловозов, представляет собой сложную исследовательскую задачу, которая может решаться двумя методами: детерминистическим и вероятностно-статистическим.

Детерминистический метод использует физические закономерности изменений исследуемого объекта, например, тепловоза, и не учитывает все многообразие реально действующих на него факторов технической эксплуатации и режимов работы дизель-генераторных установок (ДГУ) тепловозов. При анализе экспериментальных данных, отображающих множество взаимосвязанных и случайно изменяющихся параметров, целесообразнее использовать вероятностно-статистический метод [1 – 3].

По способу накопления экспериментальных данных статические методы подразделяются на активные и пассивные. Активный метод предполагает получение и последующий анализ экспериментальных данных в условиях искусственных возмущений, которые вводятся в процессе эксплуатации исследуемого объекта по заранее планируемой программе.

Способ пассивного наблюдения предполагает регистрацию параметров в режиме реальной эксплуатации тепловозов (без внесения преднамеренных возмущений). Такой способ увеличивает время эксперимента, но он оказывается экономически оправданным, а иногда единственно возможным.

Многие физические процессы, отражающие техническое состояние и воздействие внешних условий, можно выразить в виде математической модели и оценить их параметры и характеристики с помощью вероятностно-статического метода.

Исходной информацией для оценки вероятностей явились статические частоты нахождения тепловозных дизелей в том или ином режиме или состоянии.

Для составления математической модели стратегии процесса технической эксплуатации локомотив и последующего анализа рассмотрим множество  $M(w_i)$  технических состояний  $w_i$ . Эти состояния характеризуются конкретными сочетаниями параметров основных агрегатов и систем, определяющих степень работоспособности и эффективности использования тепловоза в условиях реальной эксплуатации [2 – 4].

Множество  $M(y_i)$  параметров условий эксплуатации  $y_i$  зависит от объективных и субъективных факторов, действующих в течение всего рассматриваемого периода (климатические условия, профиль и состояние пути, правила обслуживания и пропуска поездов и т. д.). Стратегия технической эксплуатации  $M(s_i)$  включает в себя наборы  $s_i$  (организационных и технологических параметров, правила ремонта, регулировки, настройки и использования тепловоза), то есть наиболее субъективную часть условий эксплуатации, которая может быть целенаправленно изменена во время наблюдения или эксперимента.

Множество  $M(\delta_i)$  состояний эксплуатации  $\delta_i$  описывается видом проводимого технического обслуживания или ремонта, выполняемой работой (стоянка, тяга поездов, выбег, горячий простой, торможение и т. д.). При более подробном рассмотрении состояний могут быть учтены, например, номер позиции контроллера машиниста, режим боксования, сочетание работы вспомогательного оборудования или другие важные для исследования обстоятельства и показатели. Графическое изображение стратегии технической эксплуатации ДГУ тепловозов показана на рисунке 1.

Ясно, что возникающее состояние эксплуатации  $\delta_i$  является не вполне детерминированным следствием наблюдаемых состояний объекта  $w_i$ , условий  $y_i$  и правил стратегии  $s_i$ .

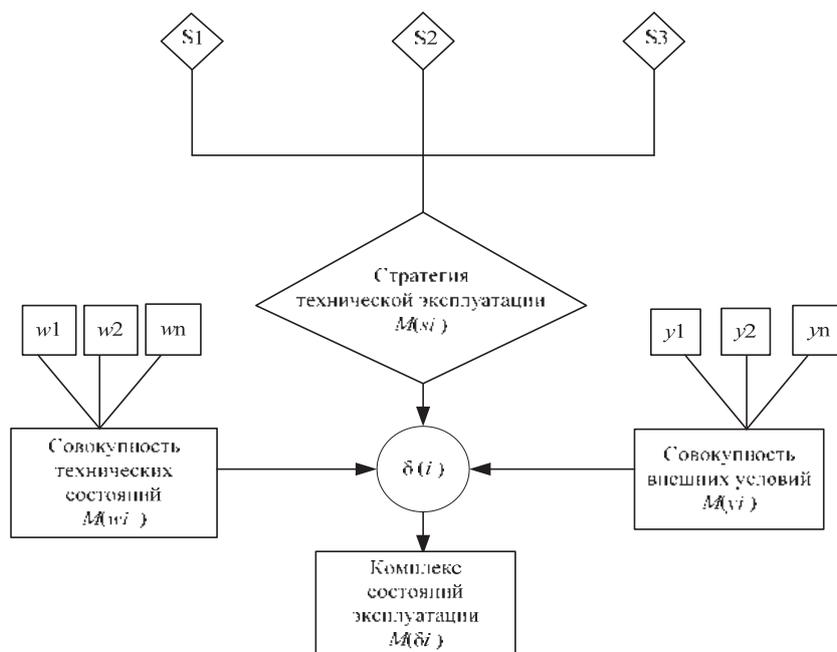


Рисунок 1 – Структурная схема стратегии технической эксплуатации тепловоза

В структурной схеме под совокупностью технических состояний подразумеваются реализуемая мощность, расход топлива, затраты на топливо и т. д.

Совокупность внешних условий – это температура и давление наружного воздуха и их влияние на параметры ДГУ тепловозов.

Объектами приложения используемых моделей являются тепловозный дизель и конкретные показатели его использования: режим работы (номер позиции контроллера машиниста), реализуемая мощность, расход топлива и его стоимость.

Поэтому процесс технической эксплуатации тепловоза определяется как стохастическое отображение комплексов состояний  $M(w_i)$ , условий  $M(y_i)$  и стратегии  $M(s_i)$  на множество  $M(\delta_i)$ , что можно выразить формулой

$$(w_i, y_i, s_i) \rightarrow (\delta_i). \quad (1)$$

Таким образом, множества  $M(w_i)$ ,  $M(y_i)$ ,  $M(s_i)$  определяют статистические закономерности чередования и продолжительности состояний  $\delta_i$ , а случайный процесс  $\delta(t)$  заключается в смене этих состояний во времени и протекает по следующей схеме. Первоначально при  $t = t_0$  процесс находится в некотором состоянии  $\delta_i$ . Через случайное время  $t_i$  пребывания в  $\delta_i$ , распределенное по закону  $F_1(t)$ , с вероятностью  $P_{ij}$  в момент  $t_1 = t_0 + t_i$  в соответствии с наблюдаемыми  $w_i$ ,  $y_i$ ,  $s_i$  возникает состояние  $\delta_j$ . При  $t_2 = t_1 + t_j$  осуществляется новый переход [3].

Оценки основных параметров процесса технической эксплуатации тепловоза могут быть получены по данным наблюдений за некоторое время  $t_n$ . Так, вероятности перехода  $P_{ij}$  оцениваются величинами

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad (2)$$

а вероятности пребывания в состояниях  $\delta_i$  –

$$P_i = \frac{t_{1n}}{t_n}, \quad (3)$$

где  $n_{ij}$  – число переходов из  $\delta_i$  в  $\delta_j$ ;

$n_i$  – число попаданий в состояние  $\delta_i$ ;

$t_{1n}$  – общее время пребывания в состоянии  $\delta_j$ .

Например, если целевым назначением локомотива считать некоторое состояние  $\delta_j$ , а через  $\bar{t}_i$  обозначить математическое ожидание времени  $t_i$  пребывания в состоянии  $\delta_i$ , то критерий использования тепловоза можно принять в виде:

$$K_j = \frac{p_j \bar{t}_j}{p_j \bar{t}_j + \sum_{i \neq j} p_i \bar{t}_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{p_j \bar{t}_j} \sum_{i \neq j} p_i \bar{t}_i} = \frac{1}{1 + \tau_j} \rightarrow \max. \quad (4)$$

В этом случае величина

$$\tau_j = \frac{1}{p_j \bar{t}_j} \sum_{i \neq j} p_i \bar{t}_i \quad (5)$$

определяет коэффициент непроизводительных потерь времени.

Если вместо  $t_i$  использовать математическое ожидание  $\bar{c}_i$  стоимости пребывания в состоянии  $\delta_i$ , то получим экономический критерий оптимизации дополнительных затрат на единицу наработки

$$C_j = \frac{1}{p_j \bar{t}_j} \sum_{i \neq j} p_i \bar{c}_i \rightarrow \min. \quad (6)$$

При подробном изучении процесса технической эксплуатации локомотива возникает необходимость более детального описания состояний  $\delta_i$ . Для тепловоза важнейшими характеристиками являются распределение номера  $k$  используемой позиции контроллера машиниста и реализуемой в работе эффективной мощности  $N_e$ . Исследования [2, 3] показали, что

для обширного восточного региона железных дорог распределение вероятностей величины  $k$  аппроксимируется суперпозицией двух законов Пуассона вида:

$$p_k = 0,535 \frac{0,5^k}{k!} e^{-0,5} + 0,465 \frac{10^k}{k!} e^{-10}, \quad (7)$$

а плотность распределения мощности можно рассматривать как суперпозицию экспоненциального и нормального законов:

$$f(N_e) = a_1 \frac{1}{N_1} e^{-\frac{N_e}{N_1}} + a_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} e^{-\frac{(N_e - \bar{N}_2)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (8)$$

где  $a_1, a_2, \bar{N}_1, \bar{N}_2$  – весовые коэффициенты и математические ожидания экспоненциальной и нормальной составляющих;

$\sigma_2$  – среднее квадратическое отклонение нормальной составляющей.

При решении конкретных задач или построении частных математических моделей необходимы дополнительные характеристики состояний  $\delta_i$  процесса технической эксплуатации. Важнейшим показателем работы тепловоза является расход топлива [5].

Если состояние  $\delta_i$  обозначать в соответствии с номером  $i$  наблюдаемой позиции контроллера машиниста, на которой дизель-генератором развивается мощность  $N_i$ , то для оценки математического ожидания затрат топлива в единицу времени получаем:

$$B_q = \sum_{i=1}^m b_e(N_e) N_i p_i, \quad (9)$$

где  $b_e(N_e)$  – зависимость удельного расхода топлива от мощности.

Выражение (9) определяет абсолютную величину расхода топлива на единицу выполненной работы дизель-генераторной установки во всем диапазоне нагрузок в процессе функционирования тепловоза [4]. Для оценки эффективности эксплуатации тепловозных дизелей необходимо перейти к среднему за время  $t_n$  часовому расходу топлива

$$B_q = \frac{B}{t_n} = \frac{\sum_{i=1}^n b_e(N_e) N_i t_i}{t_n} = \sum_{i=1}^n b_e(N_e) \bar{N}_i \bar{P}_i, \quad (10)$$

где  $\bar{P}_i$  – статическая оценка вероятности  $P_i$  пребывания дизель-генератора тепловоза в состоянии  $\delta_i$ .

В выражении (10) удельный расход топлива  $b_e(N_i)$  можно заменить его стоимостью, тогда формула (10) будет выражать денежные затраты.

Следовательно, выражение (10) определяет в математической модели процесса технической эксплуатации тепловоза величину подлежащих минимизации затрат, т. е. одну из основных целевых функций процесса.

Соответствие теоретической модели исходным экспериментальным данным проверена по критерию Хи – квадрат Пирсона.

Рассмотрим подробнее возможности минимизации затрат через отдельные составляющие формулы (10). Величины вероятностей  $P_i$  (или их статистические оценки  $\bar{P}_i$ ) характеризуют долю времени пребывания процесса эксплуатации  $\delta(t)$  в состоянии  $\delta_i$  [4].

Мощность дизель-генератора  $N_e$  реализуемая на тягу, соответствует условиям реальной эксплуатации, определяющей частоту использования различных позиций контроллера машиниста Пк, является величиной случайной, распределенной по нормальному закону с плотностью  $f(N_e)$ . Долю времени работы ДГУ на каждой позиции контроллера  $P_i$  в режиме тяги (вероятность работы на  $i$ -й позиции) можно аппроксимировать суперпозицией законов Пуассона [5 – 7].

Реализация описанной методики позволила аппроксимировать сложные распределения параметров режимов работы ДГУ при обслуживании поездов и при прогреве дизелей тепловозов в зимних условиях. Например, статистическое распределение реализуемой мощности ДГУ, тепловоза 2ТЭ116 представлено на рисунках 2, 3.

В приведенной зависимости весовой коэффициент экспоненциальной составляющей  $C_1 = 256$  при средней мощности ДГУ в режиме малых нагрузок  $\bar{N}_{e1}$ , равной 264 кВт. Коэффициент нормальной составляющей, характеризующий долю работы в основном нагрузочном режиме, составляет 0,44 при средней нагрузке  $N_{e2} = 1283$  кВт.

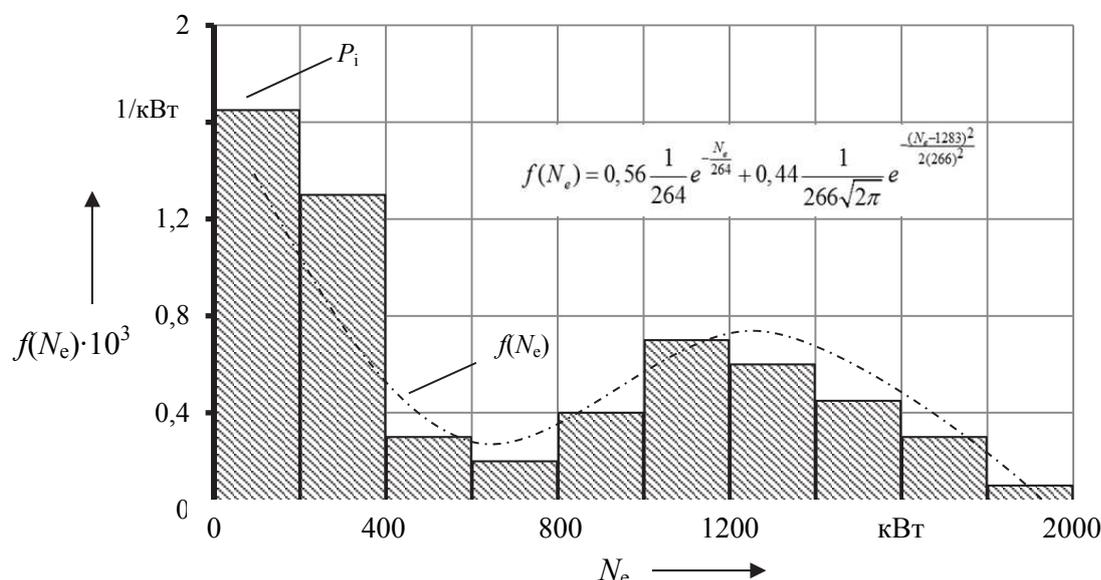


Рисунок 2 – Статическое распределение мощности ДГУ тепловоза при обслуживании порожних составов

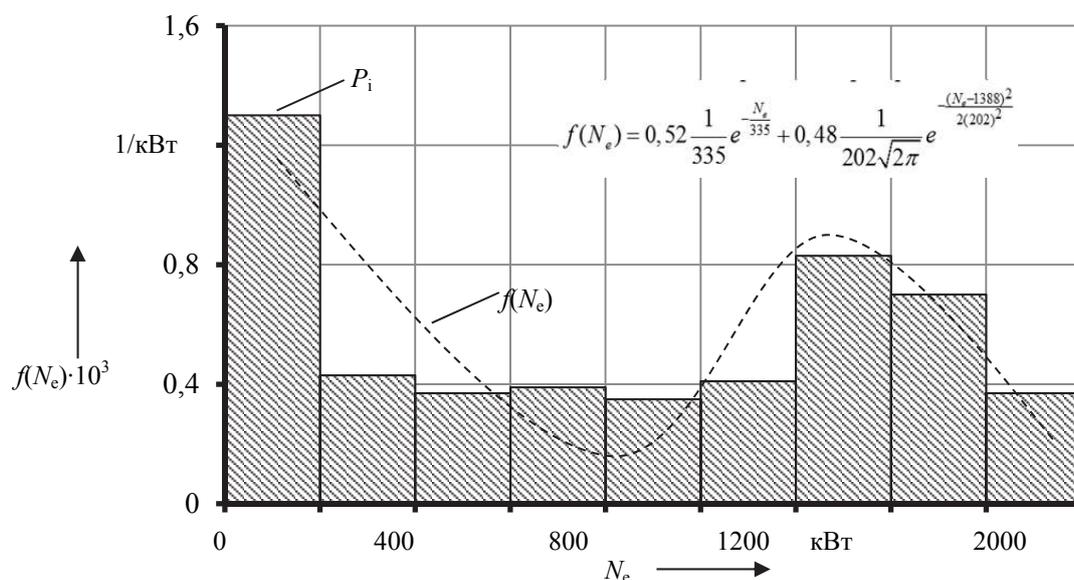


Рисунок 3 – Статическое распределение мощности ДГУ тепловоза при обслуживании груженых составов

На рисунках 2, 3 показаны параметры статических распределений реализации мощности ДГУ и расхода топлива в процессе эксплуатации тепловозов.

Таким образом, разработанная модель позволила определять параметры распределения случайных величин, характеризующих режимы нагрузки дизель-генераторных установок тепловозов в условиях их реальной эксплуатации.

## Список литературы

1. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов [Текст] / Н. Н. Смирнов, А. М. Андронов и др. – М.: Транспорт, 1974. – 304 с.
2. Александров, А. М. Вероятностное описание, экспериментальное и теоретическое исследования режимов работы тепловозных дизелей [Текст] / А. М. Александров, В. А. Четвергов, А. В. Чулков // Сб. науч. тр. ЦНИДИ. – М., 1983. – С. 11 – 27.
3. Анисимов, А. С. Вероятностная модель формирования режимов работы тепловозных дизель-генераторных установок в эксплуатации [Текст] / А. С. Анисимов, Е. И. Сквородников, А. В. Чулков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 4. – С. 2 – 9.
4. Балагин, О. В. Математическая модель процесса технической эксплуатации дизельных локомотивов [Текст] / О. В. Балагин, А. В. Чулков, Д. В. Балагин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 4. – С. 2 – 6.
5. Фофанов, Г. А. Режимы работы тепловозов и пути повышения их топливной экономичности [Текст] / Г. А. Фофанов, Э. А. Пахомов, А. А. Лосев // Вестник ВНИИЖТа. – М., 1983. – № 6. – С. 21 – 25.
6. Четвергов, В. А. Модели параметрических отказов локомотивов в эксплуатации [Текст] / В. А. Четвергов, С. М. Овчаренко, К. И. Грейф // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 2 (10). – С. 51 – 58.
7. Четвергов, В. А. Нарботка локомотивов в едином временном пространстве [Текст] / В. А. Четвергов, А. И. Мишин, П. А. Сиряк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 2 (14). – С. 37 – 45.

## References

1. Smirnov N. N., Andronov A. M., Vladimirov I. I., Lemin Y. I. *Ekspluatatsionnaia nadezhnost' i rezhimy tekhnicheskogo obsluzhivaniia samoletov* (Serviceability and modes of aircraft maintenance). Moscow: Transport, 1974, 304 p.
2. Alexandrov A. M., Chetvergov V. A., Chulkov A. V. Probabilistic description, experimental and theoretical researches of diesel engines modes [Veroiatnostnoe opisaniye, eksperimental'noye i teoreticheskoye issledovaniya rezhimov raboty teplovoznnykh dizelei] / Sbornik nauchnykh trudov CNIDI, 1983, p. 11 – 27.
3. Anisimov, A. S., Skovorodnikov E. I., Chulkov A. V. Probability model formation of modes of locomotive diesel generation sets in operation [Veroiatnostnaia model' formirovaniya rezhimov raboty teplovoznnykh dizel'-generatornykh ustanovok v ekspluatatsii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 4, p. 2 – 9.
4. Balagin O. V., Chulkov A. V., Balagin D. V. Mathematical model of technical operation process of diesel locomotives [Matematicheskaya model' protsessa tekhnicheskoi ekspluatatsii dizel'-nykh lokomotivov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 4, p. 2 – 6.
5. Fofanov G. A., Pakhomov E. A., Losev A. A. Modes of locomotives operation and ways of increase their fuel economy [Rezhimy raboty teplovoznnykh i puti povysheniya ikh toplivnoi ekonomichnosti]. *Vestnik VNIIZhTa – Bulletin of VNIIZhT*, 1983, no. 6, p. 21 – 25.

6. Chetvergov V. A., Ovcharenko S. M., Greyf K. I. Models of parametric failures of locomotives in operation [Modeli parametricheskikh otkazov lokomotivov v ekspluatatsii] *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 2 (10), p. 51 – 58.

7. Chetvergov V. A., Mischin A. I., Siryk P. A. Hours of locomotives in the same temporal space [Narabotka lokomotivov v edinom vremennom prostranstve]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 2 (14), p. 37 – 45.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Молчанов Виктор Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 41-08.

E-mail: MolchanovVV@omgups.ru

### **Носков Виталий Олегович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Лаборант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 41-08.

E-mail: NoskovVO@omgups.ru

### **Четвергов Виталий Алексеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 41-08.

### **Чулков Алексей Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 41-08.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моделирование процесса технической эксплуатации и формирования режимов нагрузки и прогрета дизель-генераторных установок тепловозов [Текст] / В. В. Молчанов, В. О. Носков и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 9 – 16.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Molchanov Viktor Vasilievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 41-08.

E-mail: MolchanovVV@omgups.ru

### **Noskov Vitalii Olegovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Technical of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 41-08.

E-mail: NoskovVO@omgups.ru

### **Chetvergov Vitalii Alexseevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 41-08.

### **Chulkov Alexsey Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 41-08.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Molchanov V. V., Noskov V. O., Chetvergov V. A., Chulkov A. V. Modeliny of technical operation process and formation of load condition and heating of diesel generation sets. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 9 – 16. (In Russian).

УДК 629.4

**В. А. Николаев**

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

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА НА ПОКАЗАТЕЛИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

***Аннотация.** В статье приведена оценка влияния параметров рессорного подвешивания грузового вагона на показатели его динамических качеств и безопасность движения. Отражены недостатки конструкции типовой трехэлементной тележки, влияющие на динамику и безопасность движения вагона. Исследована горизонтальная динамика экипажа и получено значение горизонтальной жесткости рессорного подвешивания тележки вагона в порожнем состоянии.*

***Ключевые слова:** тележка грузового вагона, воздействие на путь, устойчивость и безопасность движения, математическая модель, вертикальная и горизонтальная жесткость рессорного подвешивания.*

**Viktor A. Nikolaev**

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

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE SPRING SUSPENSION OF FREIGHT WAGON ON ITS DYNAMIC QUALITIES AND TRAFFIC SAFETY

***Abstract.** The influence of parameters of the spring suspension of freight wagon and axial load on its dynamic qualities and traffic safety. Showing the flaws of the standard three-piece bogie, influencing the dynamics and traffic safety. Investigated the horizontal dynamics of the freight vehicle and the value of horizontal stiffness of spring suspension bogie for unladen vehicle.*

***Keywords:** bogie of a freight wagon, impact on the way, sustainability and safety, mathematical model, vertical and horizontal stiffness of spring suspension.*

В условиях все возрастающей конкуренции других операторов-перевозчиков транзитных грузов между Азией и Европой (Северный морской путь, железные дороги Китая и Казахстана, автомобильный транспорт) реализация Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года основана на повышении пропускной и провозной способностей железных дорог за счет совершенствования технологии организации движения поездов (в первую очередь за счет снижения времени простоя поездов на станциях) и повышении осевой нагрузки и скорости движения подвижного состава. Вследствие того, что на российских железных дорогах скоростное и высокоскоростное движение пассажирских поездов и грузовые поезда обращаются по одним и тем же путям, необходимость введения в эксплуатацию грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25, 27 и, в перспективе, – 30 т/ось, при увеличении установленной скорости эти два фактора предъявляют соответствующие требования к показателям динамических качеств подвижного состава с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов, снижения воздействия на путь, уменьшения эксплуатационных расходов на тягу поездов и на ремонт подвижного состава и пути.

Одним из факторов, препятствующих повышению ходовой скорости движения по перегону и повышению его пропускной способности, является ограничение скорости движения порожняковых составов до 60 км/ч в кривых участках пути радиусом менее 600 м. Эта мера обусловлена необходимостью предотвращения схода порожних вагонов, оснащенных тележками 18-100 с рельсов вследствие недостаточной устойчивости их движения.

Одной из мер, способствующих улучшению показателей динамических качеств грузовых вагонов, является применение билинейного рессорного подвешивания в совокупности с новыми фрикционными узлами, в которых угол наклона фрикционных клиньев принят равным 55°, что обеспечивает эффективное демпфирование колебаний боковой качки кузова в по-

рожном режиме движения вагона. Такая схема обрессоривания экипажа реализована в конструкциях упомянутых тележек 18-9855 (Barber S-2-R), 18-194-1 (УВЗ), а также в тележке 18-1711 (Украина) и позволяет обеспечить повышение скоростей движения вагонов, прежде всего в порожнем состоянии, благодаря увеличению статического прогиба рессорного комплекта, что обеспечивает ему в таком режиме движения лучшие динамические свойства по сравнению с вагоном на тележках модели 18-100, способствующие снижению динамической нагруженности и повышению надежности автотормозного оборудования и других узлов вагона. Это повышает коэффициент устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса и, следовательно, безопасность движения вагона. Кроме того, улучшается вписывание таких вагонов в кривые за счет значительного уменьшения зазоров в буксовых проемах между буксой с кассетным подшипником и боковой рамой, что препятствует перекосам тележки в плане.

Здесь следует отметить, что создание так называемого инновационного подвижного состава (локомотивов и грузовых вагонов) идет в основном по пути копирования зарубежной техники, отдельные образцы не в полной мере отвечают современным требованиям обеспечения эффективности эксплуатации нового подвижного состава и рентабельности капитальных вложений в его модернизацию. Так, основа концепции трехэлементной тележки 18-9855 – тележки «Barber S-2-R», созданной американской компанией Standard Car Truck, была сформирована еще в первой половине XX в.

Вместе с тем уровень сил сухого трения при движении вагона в груженом режиме, по нашему мнению, представляется несколько избыточным, что в совокупности с жесткостью рессорного комплекта этой тележки в груженом состоянии, равной 4,386 кН/м (у тележки 18-100 она равна 3290 кН/мм), может привести к повышению уровня силового воздействия подвижного состава на верхнее строение пути по сравнению с тележкой с осевой нагрузкой 23,5 тс. В результате сравнительных испытаний на Западно-Сибирской железной дороге установлено, что при скорости 60 км/ч среднее значение силы воздействия вагона с осевой нагрузкой 23,5 тс на наружный рельс в кривом участке пути радиусом 300 м равно 114,2 тс, а у вагона с нагрузкой 25 тс/ось – 123,5 тс [1].

При этом, как отмечено в статье [2], «с учетом повышенной осевой нагрузки и недостаточного запаса по динамическому прогибу существенно снизился запас по максимальной силе до пробоя рессорного комплекта», приводящего к ударному воздействию колес на рельсы и снижению эксплуатационной стойкости как дисков колес, так и рельсов. Повышению ударного воздействия колес вагонов на рельс также способствует большое количество выщербин и других дефектов на поверхности катания твердых колес.

Как показано в статье [3], увеличение осевой нагрузки приводит к снижению работоспособности рельсов. Так, при движении грузовых поездов по участку Среднесибирская – Входная поездов с осевой нагрузкой 215 кН (21,94 тс/ось) и доле кривых на участке, равной 2,6 %, при  $\gamma$ -процентном ресурсе рельсов, равном 92,5 %, пропущенный тоннаж до отказа составит 923 млн т брутто, следовательно, дальнейшая эксплуатация приведет к риску изломов рельсов под поездом, особенно если учесть, что в настоящее время нагрузка на ось в новых вагонах замкнутых кольцевых маршрутов составляет 25 тс. Данные прогноза подтверждаются практикой. Так, если в 2013 г. вследствие отслоения и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса (дефект № 10) из пути было изъято 9403 рельса, то в 2015 г. их количество составило 15276 шт., из-за наличия трещин вследствие недостаточной контактно-усталостной прочности металла (дефект № 21) в 2013 г. изъято из пути 8294 рельса, а в 2015 г. – 10453 шт.

Необходимо отметить важный факт различия климатических условий железных дорог США и ЮАР, где достаточно успешно эксплуатируются тележки Барбера, от условий дорог Урала, Севера и Сибири, длительность периода низких температур на которых составляет шесть и более месяцев. В условиях низких температур, во-первых, ухудшаются условия сцепления колеса с рельсом, во-вторых, жесткость пути значительно повышается, в-третьих, происходит морозное пучение грунта, что приводит к развитию неровностей пути и, кроме этого, имеются участки вечномерзлых грунтов, обуславливающих увеличение жесткости пу-

ти (на Забайкальской железной дороге). Совокупность этих факторов также влияет на условия формирования сил в системе «колесо – рельс», особенно в зоне стыка рельсов. Как отмечено в работе [4], при увеличении осевой нагрузки от 23,5 до 25 тс средняя вертикальная сила давления колеса на рельс возрастает на 8,6 %, что служит причиной повышения интенсивности расстройств пути в целом по второму предельному состоянию. Это также приводит к формированию вертикальных неровностей пути амплитудой 10 – 15 мм [5].

Большие зазоры в сочленениях узлов тележки 18-100 и износы контактируемых поверхностей узлов трения являются причиной ее параллелограммирования (перекоса в плане), что увеличивает интенсивность износа гребней колес и головок рельсов в кривых участках пути и снижает их технический ресурс несмотря на наличие лубрикаторов. Так, вследствие формирования интенсивного бокового износа головок наружных рельсов (дефект № 44), уложенных в кривой радиусом 600 м на одном из участков Западно-Сибирской железной дороги, их срок службы составил всего 18 месяцев, а пропущенный тоннаж до образования этого острого дефекта – всего 132,2 млн т брутто.

Необходимость срочной замены изъятия из пути острodefектных рельсов и устранения просадок пути кроме прямых убытков влечет за собой значительный экономический ущерб для ОАО «РЖД» с учетом потери пропускной способности из-за необходимости выделения «окон» для смены таких рельсов и возникновения других расходов на профилактику и устранение остаточных деформаций пути.

Несмотря на то, что за счет совершенствования конструкции тележки Барбера удалось несколько снизить силы горизонтального взаимодействия набегающего колеса тележки и рельса [1], при достижении пробега 200 тыс. км, доля отцепок вагонов с такими тележками по тонкому гребню составляет 69 % и по дефектам поверхности катания колес – 31 % [6].

Отсюда следует острая необходимость создания новой конструкции тележки с улучшенными показателями системы обрессоривания, эксплуатация которой позволила бы устранить возникновение отмеченных негативных явлений. Один из новых способов повышения динамических свойств рессорного подвешивания тележки в вертикальной плоскости приведен в работе [7].

Несмотря на введение в эксплуатацию инновационных вагонов с тележками, имеющими увеличенный по сравнению с тележкой 18-100 статический прогиб (тележки 18-9855 (Barber S-2-R) и 18-194-1 (УВЗ), подавляющая часть парка грузовых вагонов, обращающихся на сети российских железных дорог и стран СНГ, оснащена тележками модели 18-100. Выполним приближенную оценку значений параметров горизонтальной жесткости рессорных комплектов этой тележки, определяющих динамические свойства грузового вагона в горизонтальной плоскости, принимая кузов, тележку и колесные пары за твердые тела. При этом будем рассматривать в горизонтальной плоскости только геометрические неровности, учитывая то, что горизонтальная жесткость пути во много раз больше жесткости системы обрессоривания экипажа.

Для оценки влияния значений конструктивных параметров трехэлементной тележки вагона модели на его динамические свойства воспользуемся приведенными ниже расчетными схемами и на основе энергетического метода Лагранжа сформируем математическую модель системы «вагон – путь». Расчетная схема механической колебательной системы «вагон – путь» приведена на рисунке 1.

Расчетная схема сил продольного и поперечного крипов, определяемых по упрощенной теории Калкера [8], в контакте колес и рельсов колесной пары и сил взаимодействия с боковыми рамами приведена на рисунке 2. Отметим здесь, что у тележки модели 18-9855 (Барбера) продольные зазоры в буксовых проемах между буксой и челюстями тележки практически отсутствуют (не превышают 2 мм), что способствует значительно меньшему перекоосу узлов тележки в плане, влияющих на износ гребней колес и рельсов, поэтому моментом трения в этом узле такой тележки можно пренебречь.

Расчетная схема сил взаимодействия в узлах сочленения боковых рам с колесными рамами и наддресорными балками приведена на рисунке 3.

Вертикальная реакция правого рессорного комплекта первой тележки вагона, действующая на надрессорную балку,

$$F_{\delta 11z} = F_{\delta 11z}^{упр} + F_{\delta 11z}^{тр}; \quad (1)$$

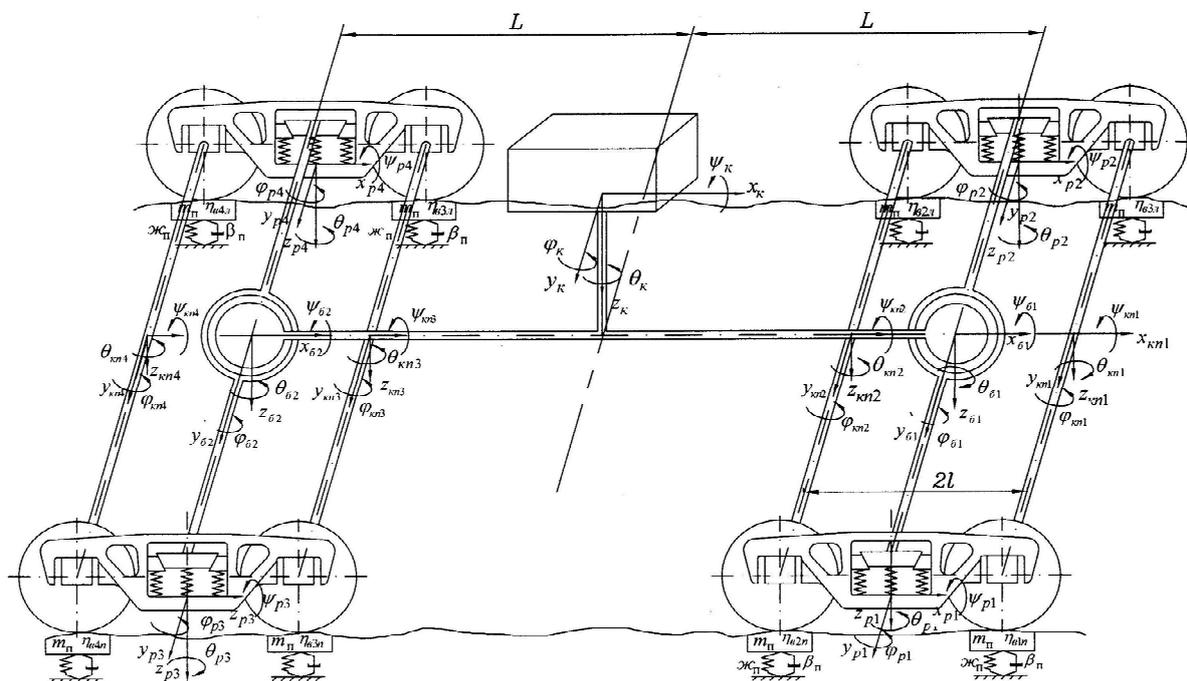


Рисунок 1 – Расчетная схема механической колебательной системы «вагон – путь»

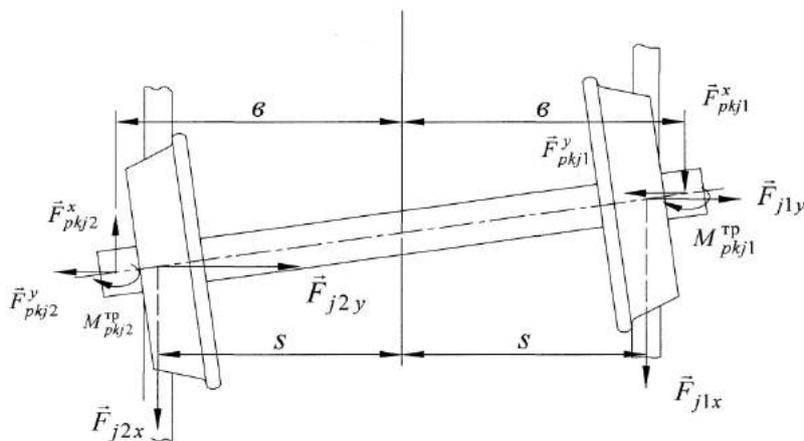


Рисунок 2 – Схема сил, приложенных к колесной паре

Упругая составляющая, обусловленная деформацией рессорного комплекта,

$$F_{\delta 11z}^{упр} = \mathcal{J}_B (f_{ст} + \Delta z_{\delta 11}), \quad (2)$$

где  $\mathcal{J}_B$  – вертикальная жесткость рессорного комплекта;  $f_{ст}$  – его статический прогиб;

$\Delta z_{\delta 11} = z_{\delta 11} - z_{p11}$  – динамическая деформация правого комплекта.

Найдем выражение для момента сил трения между пятником и подпятником, обратившись к расчетной схеме, представленной на рисунке 3.

Вначале выразим элементарную силу трения, создаваемую на площадке  $ds$ :

$$dF_{тр} = \mu p \cdot ds, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения верчения;  $p = \frac{N_{\Pi}}{S} = \frac{N_{\Pi}}{\pi(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2)}$  – давление в контакте пятника и подпятника;  $dS = \rho d\phi d\rho$  – площадь бесконечно малого элемента опорной поверхности подпятника.

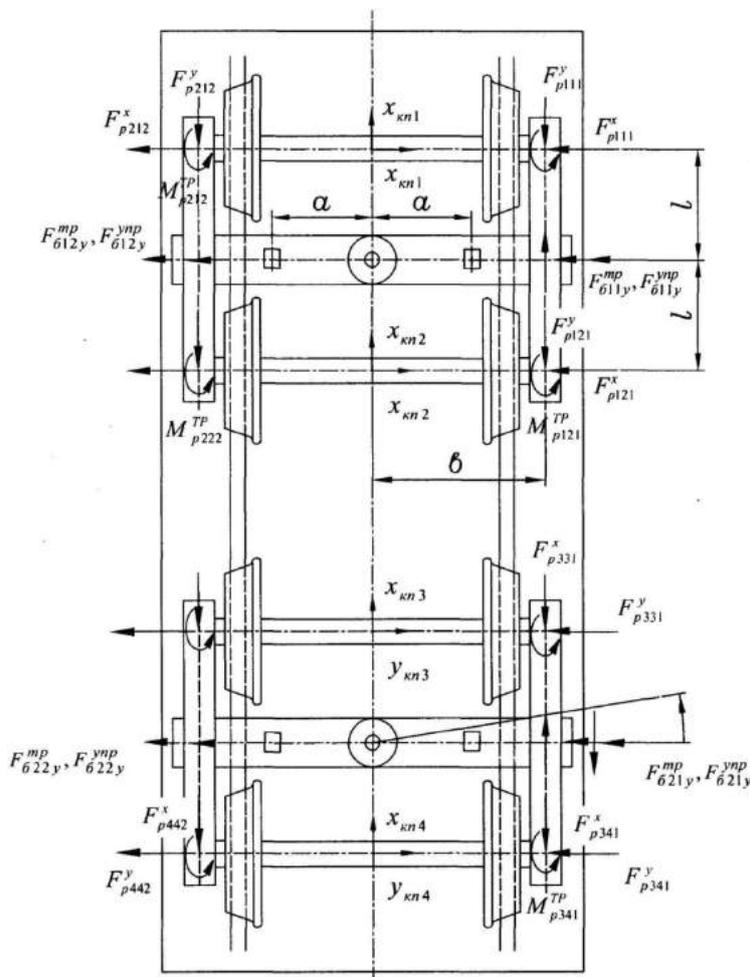


Рисунок 3 – Горизонтальные силы взаимодействия в узлах контактирования элементов первой и второй тележек

Находим элементарный момент силы трения:

$$dM = \rho dF_{\text{тр}} = \mu p \rho^2 d\rho d\phi. \quad (4)$$

Найдем полный момент трения в узле контакта пятника и подпятника при повороте надрессорной балки относительно вертикальной оси  $z$  на угол  $\phi$ , учитывая, что текущий радиус подпятника  $\rho$  изменяется от  $R_{\text{в}}$  до  $R_{\text{н}}$ :

$$M_{\text{тр}}^{\Pi} = \mu p \int_{R_{\text{в}}}^{R_{\text{н}}} \int_0^{\phi} \rho^2 d\rho d\phi. \quad (5)$$

Интегрируя выражение (5) и подставляя пределы, получаем:

$$M_{\text{тр}}^{\Pi} = \frac{\phi}{3} \mu p N_{\Pi} \frac{R_{\text{н}}^3 - R_{\text{в}}^3}{R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2}. \quad (6)$$

Момент трения, создаваемый между опорными поверхностями скользунов кузова и тележки,

$$M_c = fN_c a, \quad (7)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения между опорными поверхностями скользунов кузова и тележки;  $N_c$  – вертикальное давление на скользящий тележки;  $a$  – расстояние от скользуна до шкворня.

Суммарный момент, препятствующий повороту (вилянию) тележки относительно кузова;

$$M_{\text{тр}}^{\Sigma} = M_{\text{тр}}^{\Pi} + M_c. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что момент трения в скользунах может достигать больших значений, что препятствует повороту тележки при вписывании в кривую малого радиуса, и может быть значительным, поскольку, как показано в работе [9], максимальная вертикальная нагрузка на скользящий при движении цистерны, обусловленная центростремительным ускорением и неровностями пути, в этом случае может достигать 390 кН. В качестве одной из мер снижения момента сопротивления повороту тележки относительно вертикальной оси и, соответственно, уменьшения угла набегания гребня колеса на боковую грань головки рельса, в решающей мере определяющего износ колес и рельсов, в новых тележках Барбера для снижения момента трения в узле «пятник – подпятник» между этими элементами установлена прокладка из фторопласта, обладающего весьма малым по сравнению с парой «сталь по стали» коэффициентом трения скольжения.

Полная система уравнений, описывающих колебания кузова и узлов вагона, в соответствии с обозначениями, принятыми на рисунке 1, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^4 m_{\text{к.п}} \ddot{x}_{\text{к.п}j} = - \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^2 F_{pkji}^x - \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^2 F_{jix}; \\ & \sum_{j=1}^4 \left\{ \left( m_{\text{к.п}} + 2m_{\Pi} \alpha_{j1}^2 \right) \ddot{y}_{\text{к.п}j} - \mathcal{K}_{\Pi} \left( \alpha_{j1} - \alpha_{j2} \right) y_{\text{к.п}j} + m_{\Pi} \left[ \left( \ddot{\eta}_{\Gamma j1} - \ddot{\eta}_{\Gamma j2} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \ddot{z}_{\text{к.п}j} \left( \alpha_{j1} + \alpha_{j2} \right) + s \ddot{\psi}_{\text{к.п}j} \left( \alpha_{j1} - \alpha_{j2} \right) - \left( \alpha_{j1} \ddot{\eta}_{\text{В}j1} + \alpha_{j2} \ddot{\eta}_{\text{В}j2} \right) \right] \right\} = \sum_{j=1}^4 \left[ \sum_{k=1}^4 F_{pkji}^y - \sum_{i=1}^2 F_{jiy} \right]; \\ & \sum_{j=1}^4 \left( m_{\text{к.п}} + 2m_{\Pi} \right) \ddot{z}_{\text{к.п}j} - \sum_{j=1}^4 m_{\Pi} \left[ \left( \ddot{\eta}_{\text{В}j1} - \ddot{\eta}_{\text{В}j2} \right) + \sum_{i=1}^2 \alpha_{j2} \left( \ddot{y}_{\text{к.п}j} - \ddot{\eta}_{\Gamma j2} \right) \right] = \\ & = \sum_{j=1}^4 \mathcal{K}_{\Pi} \left[ 2z_{\text{к.п}j} - \left( \eta_{\text{В}j1} + \eta_{\text{В}j2} \right) y_{\text{к.п}j} \right] + \sum_{j=1}^4 \mathcal{K}_{\Pi} \left[ y_{\text{к.п}j} \left( \alpha_{j1} - \alpha_{j2} \right) - \right. \\ & \left. - \left( \alpha_{j1} \eta_{\Gamma j1} + \alpha_{j2} \eta_{\Gamma j2} \right) \right] + \sum_{j=1}^4 \beta_{\Pi} \left[ 2\dot{z}_{\text{к.п}j} - \left( \dot{\eta}_{\text{В}j1} + \dot{\eta}_{\text{В}j2} \right) \right] + \\ & + \sum_{j=1}^4 \beta_{\Pi} \left[ \dot{y}_{\text{к.п}j} \left( \alpha_{j1} - \alpha_{j2} \right) - \left( \alpha_{j1} \dot{\eta}_{\Gamma j1} + \alpha_{j2} \dot{\eta}_{\Gamma j2} \right) \right]; \\ & \sum_{j=1}^4 \left( J_{\text{к.п}x} + 2m_{\Pi} s^2 \right) \ddot{\psi}_{\text{к.п}j} = \sum_{j=1}^4 m_{\Pi} s \left[ \left( \ddot{\eta}_{\text{В}j1} - \ddot{\eta}_{\text{В}j2} \right) - \alpha_{j1} \left( \ddot{y}_{\text{к.п}j} - \ddot{\eta}_{\Gamma j2} \right) + \right. \\ & \left. + \alpha_{j2} \left( \ddot{y}_{\text{к.п}j} - \ddot{\eta}_{\Gamma j2} \right) \right]; \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 \sum_{j=1}^4 J_{K,\Pi z} \ddot{\theta}_{K,\Pi j} &= - \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 (F_{pkj1}^x - F_{pkj2}) b - \sum_{j=1}^4 (F_{j1x} - F_{j2x}) s - \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^2 M_{pkji}^{TP}; \\
 \sum_{j=1}^4 J_{K,\Pi y} \ddot{\phi}_{K,\Pi j} &= \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^2 F_{jix} r_{ji}; \\
 \sum_{k=1}^4 m_{pk} \ddot{x}_{pk} &= - \sum_{J=1}^4 \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^2 F_{pkji}^x + F_{\delta nix}^{TP}; \\
 \sum_{k=1}^4 m_{pk} \ddot{y}_{pk} &= - \sum_{J=1}^4 \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^2 F_{pkji}^y + F_{\delta niy}^{TP}; \\
 \sum_{k=1}^4 J_{pz} \ddot{\theta}_{pk} &= - \sum_{j=1}^4 \left( \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^2 (-1)^j F_{pkji}^y l - \frac{M_{\delta n}^{TP}}{2} \right); \\
 \sum_{n=1}^2 (\ddot{\theta}_{\delta n} - \ddot{\theta}_k) J_{\delta nz} &= \sum_{n=1}^2 (M_{\delta nz} \text{sign}(\dot{\theta}_{\delta n} - \dot{\theta}_k) + M_{\text{тп}n}); \\
 M_K^* \ddot{x}_K &= S_k - S_{k+1} - \sum_{n=1}^2 F_{\delta nx}^{TP}; \\
 M_K^* \ddot{y}_K &= \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^2 (F_{\delta niy}^{\text{уп}} - F_{\delta niy}^{TP}); \\
 M_K \ddot{z}_K &= \sum_{n=1}^2 R_{\delta n}; \\
 J_{Kx} \ddot{\psi}_K &= \sum_{i=1}^2 N_{cki} \alpha; \\
 J_{Ky} \ddot{\phi}_K &= \sum_{n=1}^2 R_{\delta n} L; \\
 J_{Kz}^* \ddot{\theta}_K &= \sum_{n=1}^2 \left[ M_{\text{тп}}^{\Sigma} + \sum_{i=1}^2 (F_{\delta niy}^{\text{уп}} - F_{\delta niy}^{TP}) L \right].
 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Сформированная математическая модель, представленная двумя подсистемами дифференциальных уравнений (9) и (10), является достаточно сложной, учитывая нелинейности сил сухого трения, а также зазоры в буксовых проемах и между наддрессорной балкой и боковыми рамами. В ней учтено влияние коничности бандажей на формирование горизонтальных сил взаимодействия колеса и рельса.

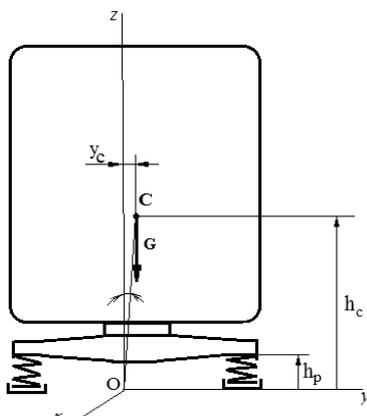


Рисунок 4 – Расчетная схема

Выполним приближенную оценку значений параметров горизонтальной жесткости рессорных комплектов тележки, необходимых для улучшения динамических свойств грузового вагона в горизонтальной плоскости.

Допуская, что колебания относительного кузова являются малыми, составим расчетную схему, приведенную на рисунке 4, и воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента механической системы:

$$\frac{d\bar{L}_o}{dt} = \bar{M}_o^e, \quad (11)$$

где  $\bar{L}_o$  – кинетический момент кузова совместно с наддрессорной балкой (полагаем, что кузов с наддрессорной балкой движется как единое целое) относительно начала системы отсчета  $O$  (ось  $y$  лежит в опорной

плоскости рессорных комплектов);  $\bar{M}_{\alpha x}^e$  – момент внешних сил, действующих на систему относительно данного центра.

Этот момент складывается из момента силы тяжести кузова и наддресорной балки, а также возвращающего момента за счет горизонтальной жесткости рессорных комплектов тележки (вследствие малости статического прогиба тележки 18-100 горизонтальные силы трения между наддресорной балкой и боковыми рамами весьма малы и ими в данном случае можно пренебречь). В проекции на ось  $x$  будем иметь:

$$\frac{dL_x}{dt} = M_{\Sigma} g h_c \sin \varphi - c_{\Gamma} h_p^2 \sin \varphi, \quad (12)$$

здесь  $L_x = M_{\Sigma} h_c^2 \dot{\varphi}$  – кинетический момент кузова относительно продольной оси пути  $x$ ;  $M_{\Sigma}$  – суммарная масса кузова и наддресорной балки;  $h_c$  – высота центра тяжести порожнего кузова до опорной поверхности;  $c_{\Gamma}$  – суммарная горизонтальная жесткость рессорных комплектов тележки;  $h_p$  – высота винтовых цилиндрических рессор комплектов тележки.

С учетом принятого допущения о малости колебаний можно записать, что

$$y_c = h_c \operatorname{tg} \varphi = h_c \varphi. \quad (13)$$

Подставляя эти приведенные значения в формулу (2), получим дифференциальное уравнение, описывающее малые колебания относительного кузова вагона:

$$M_{\Sigma} h_c^2 \ddot{\varphi} + (c_{\Gamma} h_p^2 - M_{\Sigma} g h_c) \varphi = 0. \quad (14)$$

Приводя уравнение (4) к стандартной форме, имеем:

$$\ddot{\varphi} + k^2 \varphi = 0, \quad (15)$$

где  $k = \sqrt{(c_{\Gamma} h_p^2 - M_{\Sigma} g h_c) / M_{\Sigma} g h_c}$  – собственная частота колебаний вагона,  $\text{с}^{-1}$ .

Подставив значения инерционных, жесткостных и геометрических параметров узлов порожнего полувагона в подкоренное выражение, получим собственную частоту колебаний относительного кузова, равную 5,09 Гц.

Как следует из формулы (14), для того чтобы колебания были устойчивыми, необходимо выполнение условия

$$c_{\Gamma} h_p^2 - M_{\Sigma} g h_c > 0. \quad (16)$$

Подстановка соответствующих значений параметров для порожнего состояний вагона дает, учитывая воздействие боковой силы ветра, нижнюю границу суммарной горизонтальной жесткости рессорных комплектов тележки  $c_{\Gamma}^{\text{II}} = 12 \cdot 10^5$  кН/м, что в семь раз меньше значения этого параметра тележки модели 18-100, приведенного в работе [10]. Заметим, что в работе [11] в результате оценки критической скорости движения порожнего вагона (при наличии обрессоривания экипажа) рекомендовано значение этой жесткости не ниже  $18 \cdot 10^5$  кН/м.

Таким образом, существующее значение суммарной горизонтальной жесткости рессорных комплектов тележки 18-100 является завышенным в несколько раз. Полученный результат указывает на то, что колебания относительного кузова, обусловленные наличием горизонтальных неровностей пути, происходят в дорезонансном и резонансном режимах, что негативно влияет на устойчивость движения вагона и безопасность движения поезда в целом и является причиной вводимых ограничений установленной скорости движения поезда.

Точную оценку значений жесткости и демпфирования системы обрессоривания кузова вагона в горизонтальной плоскости можно получить из условия обеспечения равенства кине-

тической энергии колебаний относительного кузова суммарной работе упругих и диссипативных сил, т. е.

$$\frac{M_{\Sigma} \dot{y}^2}{2} = \int_0^{\Delta} F(y) dy + \int_0^{\Delta} F_{\text{тр}} dy, \quad (17)$$

где  $\int_0^{\Delta} F(y) dy$  – работа силы упругого элемента (в общем случае – элемента связи наддрессорной балки с боковой рамой тележки, имеющего рациональную нелинейную силовую характеристику) на перемещении  $\Delta$ , т. е. поперечный зазор между наддрессорной балкой и боковой рамой;  $\int_0^{\Delta} F_{\text{тр}} dy$  – работа сил трения в системе.

Отметим, что среднее значение зазора между упорами наддрессорной балки и боковой рамой тележки модели 18-9855 (Barber-S-2-R) составляет около 15 мм, что повышает устойчивость против выжимания вагона, но вместе с тем такой зазор недостаточен для эффективного поглощения энергии колебаний относительного кузова и снижения интенсивности износа гребней колес и рельсов.

Из всего изложенного следует, что решение проблемы повышения провозной и пропускной способностей российских железных дорог зависит прежде всего от показателей динамических качеств грузовых вагонов, определяющих их конструкционную скорость. В связи с этим существует острая необходимость решения задачи создания тележки с переменной структурой – с различными значениями вертикальной и горизонтальной жесткостей системы обдрессирования вагона и соответствующим демпфированием в его порожнем и груженом состояниях, обеспечивающими устойчивость и безопасность движения грузового поезда и снятие ограничений на установленную скорость движения по участку.

### Список литературы

1. Гапанович, В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении [Текст] / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С. 10 – 15.
2. Мещерин, Ю. В. О рессорном подвешивании тележек грузовых вагонов [Текст] / Ю. В. Мещерин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 2 (46). – С. 33 – 35.
3. Карпущенко, Н. И. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях [Текст] / Н. И. Карпущенко, П. С. Труханов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 2 (26). – С. 118 – 126.
4. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой [Текст] / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 233 – 237.
5. Воздействие длинносоставных поездов на путь [Текст] / В. С. Коссов, А. А. Лунин и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М., 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 224 – 231.
6. Лосев, Д. Н. Вагоны на тележках «Барбер»: итоги эксплуатации [Текст] / Д. Н. Лосев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 8.
7. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2010. – 340 с.
8. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава [Текст] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати / М.: Транспорт, 1988. – С. 130.
9. Оценка динамических сил, действующих на скользуны постоянного контакта для тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм [Текст] / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова и др. // Техника железных дорог. – 2012. – № 1 (17). – С. 26 – 29.
10. Сенаторов, С. А. Прогнозирование нагруженности, износа и динамики подвижного состава: Ч.1. Динамические системы подвижного состава и методы их исследования [Текст] /

С. А. Сенаторов / Уральский электромеханический ин-т инж. железнодорожного трансп. – Екатеринбург, 1996. – 104 с.

11. Орлова, А. М. Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов: Автореф. дис... доктора техн. наук [Текст] / А. М. Орлова. – СПб, 2008. – 32 с.

## References

1. Gapanovich V. A. Problems of interaction between rolling stock and infrastructure under heavy traffic [Voprosy vzaimodeistviia podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tiazhelovesnom dvizhenii]. *Zheleznodorozhnyi transport – Rail transport*, 2016, no. 10, pp.10 – 15.

2. Meshcherin Iu. V. On the spring suspension of cargo wagon carriages [O ressonom podveshivani telezhok gruzovykh vagonov]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo – Wagons and wagons*, no. 2 (46), 2016, pp. 33 – 35.

3. Karpushchenko N. I., Trukhanov P. S. Evaluation and prediction of rail reliability in various operating conditions [Otsenka i prognozirovanie nadezhnosti rel'sov v razlichnykh ekspluatatsionnykh usloviakh]. *Izvestiia Transsiba – Izvestiya Transsib*, no. 2, 2016, pp. 118 – 126.

4. Tret'iakov V. V., Petropavlovskaya I. B., Pevzner V. O. Influence on the way of cars with increased axial load [Vozdeistvie na put' vagonov s povyshennoi osevoi nagruzkoi]. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik VNIIZhT*, T. 75, no. 5, 2016, pp. 233 – 237.

5. Kossov, V. S., Lunin A. A., Panin Iu. A. The influence of long-distance trains on the way [Vozdeistvie dlinnosostavnykh poezdov na put']. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik VNIIZhT*, T. 75, no. 5, 2016, pp. 224 – 231.

6. Losev, D. N. Cars on trolleys «Barber»: results of operation [Vagony na telezhkakh «Barber»: itogi ekspluatatsii]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo – Cars and carload economy*, 2016, no. 4, pp. 8.

7. Galiev, I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. *Metody i sredstva vibrozashchity zheleznodorozhnykh ekipazhei* (Methods and means of vibration protection of railway carriages). Moscow, 2010, 340 p.

8. Garg, V. K., Dukkipati R. V. *Dinamika podvizhnogo sostava* (Dynamics of the rolling stock). Moscow: Transport, 1988, 130 p..

9. Boronenko, Iu. P., Orlova A. M., Rudakova E. A., Saidova A. V. Evaluation of the dynamic forces acting on the constant contact for the freight wagons of iron wagons with an expensive gauge of 1520 mm [Otsenka dinamicheskikh sil, deistvuiushchikh na skol'zunny postoiannogo kontakt dlia telezhok gruzovykh vagonov zheleznykh dorogo kolei 1520 mm]. *Tekhnika zheleznykh dorog – Technique of railways*, 2012, no. 1 (17), pp. 26 – 29.

10. Senatorov, S. A. *Prognozirovanie nagruzhennosti, iznosa i dinamiki podvizhnogo sostava: Ch.1. Dinamicheskie sistemy podvizhnogo sostava i metody ikh issledovaniia* (Prediction of Loading, Wear and Dynamics of Rolling Stock: Part. Dynamic systems of rolling stock and methods for their study). Ekaterinburg: UEmIT, 1996, 104 p.

11. Orlova, A. M. *Vliianie konstruktivnykh skhem i parametrov telezhok na ustoichi-vost', khodovyye kachestva i nagruzhennost' gruzovykh vagonov* (Influence of constructive schemes and parameters of bogies on stability, driving qualities and loading of freight cars). Doctor's thesis, S.-Peterburg, 2008, 32 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Николаев Виктор Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nikolaev Viktor Aleksandrivich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Николаев, В. А. Оценка влияния параметров ресорного подвешивания грузового вагона на показатели его динамических качеств и безопасность движения [Текст] / В. А. Николаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 17 – 27.

Nikolaev V. A. Evaluation of the influence of the parameters of the spring suspension of freight wagon on its dynamic qualities and traffic safety. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 17 – 27. (In Russian).

УДК 629.424.3:621.436

**С. М. Овчаренко, О. В. Балагин, Д. В. Балагин**

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

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Аннотация.* В статье рассмотрен способ повышения эффективности системы охлаждения тепловозов в эксплуатации – использование перепуска теплоносителей между контурами.

*Ключевые слова:* система охлаждения тепловозов, частота вращения, дизель, температура, коэффициенты теплопередачи, математическая модель, теплообменный аппарат, охлаждающий воздух, математическая модель.

**Sergey M. Ovcharenko, Oleg V. Balagin, Dmitry V. Balagin**  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## INCREASE IN OVERALL PERFORMANCE LOCOMOTIVES COOLING SYSTEMS IN OPERATION

*Abstract.* In article the way increases in system effectiveness of cooling locomotives in operation – use relaunches of heat carriers between contours is considered.

*Keywords:* locomotive cooling system, rotating speed, diesel, temperature, heat transfer coefficients, mathematical model, the heat-exchanging device cooling air, mathematical model.

По мере совершенствования тепловозов и особенно с ростом их секционной мощности повышаются и требования, предъявляемые к системе охлаждения тепловозов (СО). Система охлаждения современных, более мощных тепловозов должна обеспечивать увеличенный теплоотвод практически в тех же габаритах, что у существующих, не допускать снижения температуры теплоносителей до критических значений, перегрева деталей цилиндропоршневой группы дизеля и т. д. Удельные затраты мощности на функционирование СО при этом должны снижаться по сравнению с существующими аналогами.

Для повышения эффективности СО тепловозов существуют различные способы [3]:

- 1) повышение эффективности теплорассеивающей способности секций водовоздушных радиаторов и снижение их аэродинамического сопротивления;
- 2) увеличение производительности вентиляторных установок с одновременным повышением их экономичности;
- 3) снижение сопутствующих аэродинамических потерь при течении воздуха в шахтах;
- 4) добавление в охлаждающую воду специальных присадок, снижающих накипь в трубопроводах;
- 5) использование перепуска теплоносителей между контурами СО тепловоза.

В данной статье предлагается для повышения эффективности СО рассмотреть возможность использования перепуска теплоносителей между контурами СО тепловоза.

На основе проведенных исследований предложена расчетная схема системы охлаждения с перепуском теплоносителей на примере тепловоза ЧМЭЗ.

Для расчетного определения теплотехнических характеристик двухконтурной СО дизеля с перепуском теплоносителей необходимо выявить связь между элементами СО с определением входных и выходных координат каждого элемента (рисунок 1) [1, 2]. Система охлаждения тепловоза содержит водяную систему дизеля, масляную систему дизеля, систему воздухообеспечения дизеля, водомасляный теплообменник (ВМТ), охладитель наддувочного воздуха (ОХНВ), предназначенные для охлаждения масла дизеля и наддувочного воздуха промежуточным теплоносителем (водой) перед поступлением их в системы дизеля, масляный насос, два водяных насоса, секции радиаторов охлаждающего устройства, вентилятор, трехходовой переключатель (ТХПК), две точки смешения воды в горячем и холодном контурах.

Каждый элемент СО имеет свои входные и выходные координаты.

Для водяной системы дизеля входными координатами являются тепловыделение дизеля в воду  $Q_B$ , расход воды через дизель  $G_B^I$ , температура воды на входе в дизель  $T_B''$  и температура воды на выходе из дизеля  $T_B'$ .

Для масляной системы и системы воздухообеспечения дизеля входными координатами являются тепловыделение в масло  $Q_M$  и наддувочный воздух  $Q_{НВ}$ , расходы масла  $G_M$  и наддувочного воздуха  $G_{НВ}$  через дизель, температура масла  $T_M'$  и наддувочного воздуха  $T_S$  на входе в дизель. Выходными координатами этих систем дизеля являются  $G_M$  и  $G_{НВ}$  и температуры масла на выходе из дизеля  $T_M''$  и наддувочного воздуха на выходе из турбокомпрессора  $T_K$ . При этом очевидно, что  $G_{НВ}$  и  $T_K$  являются входными координатами ОХНВ, а  $G_{НВ}$  и  $T_S$  – его выходными координатами.

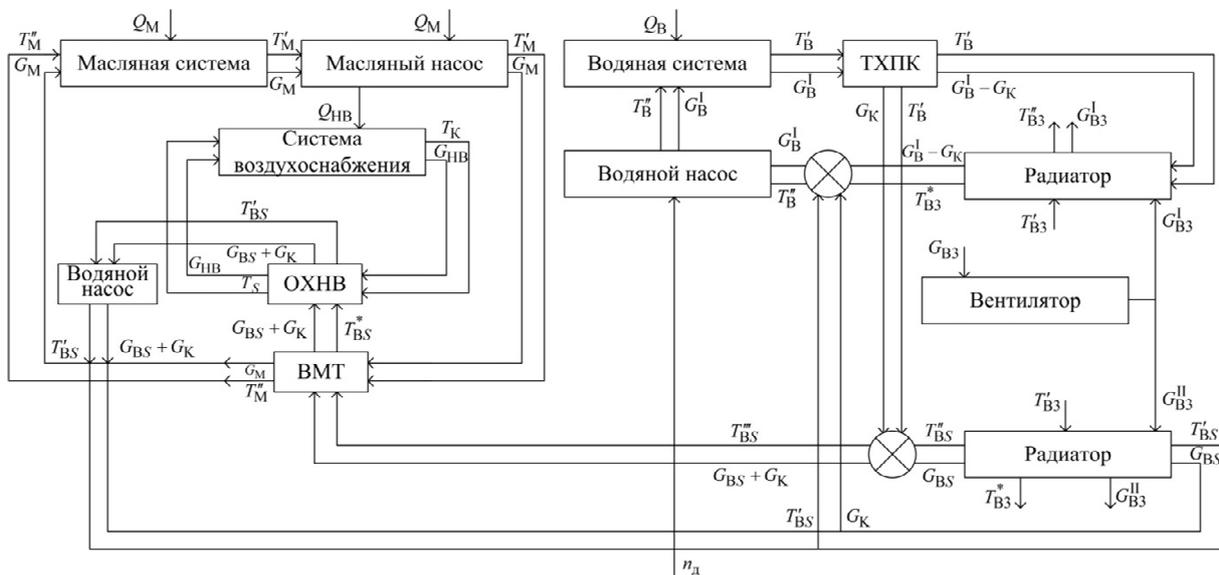


Рисунок 1 – Расчетная схема двухконтурной связанной СО дизеля тепловоза ЧМЭЗ

В случае выполнения условия отсутствия потерь теплоты маслом дизеля в масляном насосе для ВМТ входными координатами являются  $G_M$  и  $T_M''$ . Соответственно выходными координатами ВМТ являются  $G_M$  и  $T_M'$ .

Другими входными и выходными координатами ВМТ и ОХНВ являются расход и температура промежуточного теплоносителя – воды холодного контура. Входными координатами ВМТ являются расход промежуточного теплоносителя ( $G_{BS} + G_K$ ) и температура промежуточного теплоносителя на входе в ВМТ  $T_{BS}'''$ . Выходными координатами ВМТ и входными

координатами ОХНВ кроме координат теплоносителей дизеля являются  $(G_{B3} + G_K)$  и температура промежуточного теплоносителя на выходе из ВМТ и входе в ОХНВ  $T_{BS}^*$ , а выходными координатами ОХНВ являются  $(G_{BS} + G_K)$  и температура промежуточного теплоносителя на выходе из ОХНВ  $-T'_{BS}$ .

Трехходовой перепускной кран (ТХПК), осуществляющий перепуск теплоносителей между контурами СО, имеет входные координаты  $G_B^I$  и  $T'_B$ , а выходные координаты – расход воды дизеля через секции радиатора  $(G_B^I - G_K)$  и  $T'_B$ , а также расход воды на перепуск  $G_K$  и  $T'_B$ . Очевидно при этом, что точка смешения воды дизеля и промежуточного теплоносителя холодного контура имеет входные координаты  $G_K, T'_B$ , расход промежуточного теплоносителя холодного контура через секции радиатора  $G_{BS}$  и температуру промежуточного теплоносителя на выходе из секций радиаторов  $T''_{BS}$ .

Для поддержания гидравлического давления в контурах СО оборудованы трубопроводом, соединяющим холодный и горячий контуры и обеспечивающим обратный перепуск воды: воды холодного контура и контура охлаждения воды дизеля. Поэтому СО имеют вторую точку смешения воды. Входными координатами этой точки смешения являются расход воды через секции радиатора горячего контура  $(G_B^I - G_K)$ , ее температура на выходе из секции радиатора  $T_B^*$  и расход промежуточного теплоносителя холодного контура на перепуск  $G_K$  и  $T'_{BS}$ . При этом предполагается, что расход воды на перепуск из горячего контура в холодный контур и обратно одинаков, а в водяных насосах обоих контуров и ТХПК потери теплоты теплоносителями отсутствуют.

Для секций радиаторов горячего и холодного контуров входными координатами являются соответственно расход воздуха  $G_{B3}^I$  и  $G_{B3}^{II}$ , температура наружного воздуха  $T'_{B3}$  и расход и температура воды дизеля  $(G_B^I - G_K), T'_B$  и промежуточного теплоносителя  $G_{BS}$  и  $T'_{BS}$ , а выходными координатами – расход и температура воды дизеля и промежуточного теплоносителя  $(G_B^I - G_K), T_B^*, G_{BS}, T''_{BS}$ , и расход и температура охлаждающего воздуха через секции радиаторов горячего и холодного контуров  $G_{B3}^I, T'_{B3}, G_{B3}^{II}$  и  $T''_{B3}$ .

Входной координатой вентилятора является его частота вращения. Его выходной координатой является расход воздуха  $(G_{B3}^I + G_{B3}^{II})$  через секции радиаторов обоих контуров.

Насосы, как масляный, так и водяные, также имеют одной из входных координат частоты вращения, пропорциональные частоте вращения дизеля. Остальные входные координаты насосов соответствуют входным координатам вследствие отсутствия потери теплоты в них.

Таким образом, для двухконтурной СО дизеля с перепуском теплоносителей между контурами, входными координатами являются тепловыделения дизеля  $Q_B, Q_M, Q_{HB}$ , частота вращения дизеля и температура наружного воздуха  $n_d, T'_{B3}$ . Вследствие применения в СО перепуска теплоносителей между контурами происходит перераспределение теплоотводов в секциях радиатора и в теплообменниках, выполняющих в данном случае функции как охладителей, так и подогревателей теплоносителей дизеля. Поэтому горячий и холодный контуры нельзя рассматривать как независимые друг от друга, так как они входят в единую СО, оба контура которой связаны между собой расходом теплоносителей на перепуск между контурами.

Связи между входными и выходными координатами элементов СО и контуров в целом описываются соответствующими статическими характеристиками. Для определения статических характеристик и параметров двухконтурной связанной СО ДВС с перепуском тепло-

носителей между контурами необходимо знать расходные характеристики горячего и холодного контуров, параметры теплообменных аппаратов, а также тепловыделение дизеля в теплоносителях при различных значениях мощности дизеля  $N_{ед}$  и температуре наружного воздуха  $T'_{B3}$ .

На стадии первичной разработки методики принят ряд допущений, которые в незначительной степени сказываются на точности расчетов характеристик СО, но позволяют значительно упростить методику расчета [2, 3].

Первым из них является допущение о том, что тепловыделения дизеля не зависят от температуры его теплоносителей и являются лишь функциями  $N_{ед}$  и  $T'_{B3}$ .

Второе допущение заключается в том, что нелинейные уравнения теплопередачи теплообменных аппаратов заменяются линейными, т. е. среднелогарифмический температурный напор в теплообменном аппарате заменяется среднеарифметическим, что вполне допустимо при небольшой разнице в значениях температуры обоих теплоносителей.

Третьим допущением является то, что зависимости коэффициентов теплопередачи теплообменных аппаратов и секций радиаторов принимаются как степенные функции массовых скоростей теплоносителей. Влияние же на их значения температуры теплоносителей, омывающих поверхности теплообмена, не учитывается.

С учетом принятых допущений и на основании уравнений равновесного состояния, теплопередачи и смешения однородных жидкостей система, описывающая статистические характеристики двухконтурной СО, будет иметь вид [3 – 5]:

$$Q_B = G_B^I c_B (T'_B - T''_B); \quad (1)$$

$$(G_B^I - G_K) c_B (T'_B - T_B^*) = G_{B3}^I c_{B3} (T''_{B3} - T'_{B3}); \quad (2)$$

$$G_{B3}^I c_{B3} (T''_{B3} - T'_{B3}) = k_B^I F_B^I \left( \frac{T'_B + T_B^*}{2} - \frac{T''_{B3} + T'_{B3}}{2} \right); \quad (3)$$

$$Q_X = G_M c_M (T'_M - T''_M); \quad (4)$$

$$Q_X = (G_{BS} + G_K) c_B - (T_{BS}^* - T''_{BS}); \quad (5)$$

$$Q_X = k_{BMT}^{II} F_{BMT}^{II} \left( \frac{T'_M + T''_M}{2} - \frac{T''_{BS} + T_{BS}^*}{2} \right); \quad (6)$$

$$Q_{HB} = G_{HB} c_{B3} (T_K - T_S); \quad (7)$$

$$Q_{HB} = (G_{BS} + G_K) c_B \cdot (T'_{BS} - T''_{BS}); \quad (8)$$

$$Q_{HB} = k_{OXHB} F_{OXHB} \left( \frac{T_K + T_S}{2} - \frac{T'_{BS} + T''_{BS}}{2} \right); \quad (9)$$

$$G_{BS} c_B (T'_{BS} - T''_{BS}) = G_{B3}^{II} c_{B3} (T''_{B3} - T'_{B3}); \quad (10)$$

$$G_{B3}^{II} c_{B3} (T''_{B3} - T'_{B3}) = k_B^{II} F_B^{II} \left( \frac{T'_{BS} + T''_{BS}}{2} - \frac{T''_{B3} + T'_{B3}}{2} \right); \quad (11)$$

$$G_K c_B T'_B + c_B G_{BS} T''_{BS} = (G_{BS} + G_K) c_B \cdot T''_{BS}; \quad (12)$$

$$G_K c_B T'_{BS} + (G_B^I - G_K) c_B \cdot T_B^* = G_B^I c_B T_B'' \quad (13)$$

где  $Q_B, Q_M, Q_{HB}$  – тепловыделения ДВС в воду, масло, теплоотвод от наддувочного воздуха, кВт;

$Q_X$  – теплоотвод от масла в воду в водомасляном теплообменнике, кВт;

$c_B, c_M, c_{B3}$  – удельная теплоемкость воды, масла и воздуха, кДж/(кг·К);

$G_B^I, G_{B3}^I, G_{BS}, G_M, G_{HB}, G_{B3}^{II}$  – массовый расход воды и воздуха через радиаторы охлаждающего устройства в горячем контуре, воды, масла, наддувочного воздуха и воздуха через радиаторы охлаждающего устройства в холодном контуре, кг/с;

$k_B^I, F_B^I, k_{BMT}^I, F_{BMT}^I, k_{OXHB}, F_{OXHB}, k_B^{II}, F_B^{II}$  – коэффициенты теплопередачи и площади поверхностей секций радиаторов горячего контура, водомасляного теплообменника, охладителя наддувочного воздуха и секции радиаторов холодного контура, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T'_B, T''_B, T_B^*$  – температура воды на выходе из дизеля, на входе в дизель и после секции радиаторов горячего контура, К;

$T'_M, T''_M$  – температура масла на выходе из дизеля, входе в дизель (после водомасляного теплообменника), К;

$T_K, T_S$  – температура наддувочного воздуха на выходе из турбокомпрессора и на входе в дизель, К;

$T'_{BS}, T''_{BS}, T'''_{BS}, T^*_{BS}$  – температура воды на входе в секции радиаторов, выходе из секций радиаторов, входе в водомасляный теплообменник, входе в охладитель наддувочного воздуха, К;

$T'_{B3}, T''_{B3}, T^*_{B3}$  – температура наружного воздуха, воздуха после секций радиаторов охлаждающего устройства горячего контура и после секций радиаторов холодного контура, К;

$G_K$  – расход воды на перепуск из горячего контура в холодный контур и обратно, кг/с.

Теплотехнические испытания дизелей тепловозов и экспериментальные исследования работы СО дизелей показывают, что с хорошей точностью тепловыделения дизеля в теплоносители аппроксимируются полиномами различной степени от  $n_d$  и  $T'_{B3}$  вида [3]:

$$Q_d = Q_d^{HOM} (a n_d^2 + b n_d + c) + \Delta Q_d T'_{B3} n_d \quad (14)$$

где  $Q_d$  – тепловыделение дизеля при данных значениях  $n_d$  и  $T'_{B3}$ , кВт;

$Q_d^{HOM}$  – тепловыделение дизеля при номинальном режиме работы и  $T'_{B3} = 273$  К, кВт;

$\Delta Q_d$  – приращение тепловыделения дизеля при постоянной нагрузке и изменении  $T'_{B3}$  на 1 К, кВт;

$a, b, c$  – эмпирические постоянные коэффициента аппроксимирующей зависимости  $Q_d = \varphi(n_d, T'_{B3})$ .

Следовательно, зависимости тепловыделений дизеля в его теплоносители – воду, масло и наддувочный воздух – от  $n_d$  можно представить в виде [3]:

$$Q_B = Q_B^{HOM} (a_1 n_d^2 + b_1 n_d + c_1) + \Delta Q_B T'_{B3} n_d \quad (15)$$

$$Q_M = Q_M^{HOM} (a_2 n_d^2 + b_2 n_d + c_2) + \Delta Q_M T'_{B3} n_d \quad (16)$$

$$Q_{HB} = Q_{HB}^{HOM} (a_3 n_d^2 + b_3 n_d + c_3) + \Delta Q_{HB} T'_{B3} n_d \quad (17)$$

где  $Q_B^{\text{НОМ}}$ ,  $Q_M^{\text{НОМ}}$ ,  $Q_{\text{НВ}}^{\text{НОМ}}$  – тепловыделение дизеля соответственно в воду, масло и наддувочный воздух при номинальном режиме работы дизеля и  $T'_{\text{В3}} = 273$  К, кВт.

$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$  – постоянные эмпирические моменты;

$\Delta Q_B, \Delta Q_M, \Delta Q_{\text{НВ}}$  – приращение тепловыделений дизеля соответственно в воду, масло и наддувочный воздух при изменении  $T'_{\text{В3}}$  на 1 К, кВт.

Массовый расход теплоносителей дизеля также является зависимостью от  $n_{\text{д}}$ , так как насосы имеют привод от вала дизеля. Поэтому расход теплоносителей, подаваемых водяными насосами, будет являться линейной зависимостью от  $n_{\text{д}}$ :

$$G_B^I = G_B^{\text{НОМ}} (d_1 n_{\text{д}} + l_1); \quad (18)$$

$$G_{\text{BS}} = G_{\text{BS}}^{\text{НОМ}} (d_2 n_{\text{д}} + l_2), \quad (19)$$

где  $G_B^{\text{НОМ}}$ ,  $G_{\text{BS}}^{\text{НОМ}}$  – массовый расход воды соответственно в горячем и холодном контурах при номинальном режиме работы дизеля и  $T'_{\text{В3}} = 273$  К, кг/с;

$d_1, d_2, l_1, l_2$  – постоянные эмпирические коэффициенты аппроксимирующих зависимостей  $G_B^I, G_{\text{BS}} = \varphi_1(n_{\text{д}})$ .

Массовый расход масла дизеля, прокачиваемого масляным насосом, и наддувочного воздуха определяется нелинейными функциями от  $n_{\text{д}}$  и описывается соответственно функциями:

$$G_M = G_M^{\text{НОМ}} (d_3 \sqrt{n_{\text{д}}} + g_3 n_{\text{д}} + l_3); \quad (20)$$

$$G_{\text{НВ}} = G_{\text{НВ}}^{\text{НОМ}} (d_4 n_{\text{д}}^2 + g_4 n_{\text{д}} + l_4), \quad (21)$$

где  $G_M^{\text{НОМ}}$ ,  $G_{\text{НВ}}^{\text{НОМ}}$  – массовый расход соответственно масла дизеля и наддувочного воздуха при номинальных частотах вращения масляного насоса и турбокомпрессора, кг/с;

$d_3, d_4, g_3, g_4, l_3, l_4$  – постоянные эмпирические коэффициенты аппроксимирующих зависимостей.

При определении массового расхода охлаждающего воздуха через секции радиаторов охлаждающего устройства для упрощения принимается, что он линейно зависит от частоты вращения вентилятора  $n_{\text{в}}$  и что плотность воздуха имеет постоянные значения в интервале изменения температуры воздуха от 233 до 423 К. На основании этих условий массовый расход охлаждающего воздуха может быть представлен следующими зависимостями:

$$G_{\text{В3}}^I = G_{\text{В3}}^{\text{НОМ}} \left( \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{в}}^{\text{НОМ}}} \right); \quad (22)$$

$$G_{\text{В3}}^{\text{II}} = G_{\text{В3}}^{\text{НОМ}} \left( \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{в}}^{\text{НОМ}}} \right), \quad (23)$$

где  $G_{\text{В3}}^{\text{НОМ}}$ ,  $G_{\text{В3}}^{\text{НОМ}}$  – массовый расход охлаждающего воздуха при номинальной частоте вращения вентилятора и  $T'_{\text{В3}} = 273$  К, кг/с;

$n_{\text{в}}$  – частота вращения вентилятора, мин<sup>-1</sup>;

$n_{\text{в}}^{\text{НОМ}}$  – номинальная частота вращения вентилятора, мин<sup>-1</sup>.

При этом  $G_{B3}^{IHOМ}$  и  $G_{B3}^{IIHOМ}$  будут определяться полным массовым расходом охлаждающего воздуха через секции радиатора и соответственно отношением количества секций радиаторов горячего и холодного контуров к их общему количеству:

$$G_{B3}^{IHOМ} = G_{B3}^{HOМ} \frac{m_1}{m_1 + m_2}; \quad (24)$$

$$G_{B3}^{IIHOМ} = G_{B3}^{HOМ} \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (25)$$

где  $G_{B3}^{HOМ}$  – суммарный массовый расход воздуха через секции радиаторов горячего и холодного контуров при  $n_B^{HOМ}$ , кг/с;

$m_1, m_2$  – количество секций радиаторов охлаждающего устройства соответственно горячего и холодного контуров, шт.

Подставляя выражения (24) и (25) в (22) и (23), получим зависимости массовых расходов охлаждающего воздуха в виде:

$$G_{B3}^I = G_{B3}^{HOМ} \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{n_B}{n_B^{HOМ}} \right); \quad (26)$$

$$G_{B3}^{II} = G_{B3}^{HOМ} \left( \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \cdot \left( \frac{n_B}{n_B^{HOМ}} \right). \quad (27)$$

Поверхности теплообмена ОХНВ и ВМТ являются постоянными паспортными величинами. Очевидно, что полные поверхности секции радиаторов горячего и холодного контуров определяются по уравнениям:

$$F_B^I = m_1 \cdot f_{B3}; \quad (28)$$

$$F_B^{II} = m_2 \cdot f_{B3}, \quad (29)$$

где  $f_{B3}$  – поверхность теплообмена секции радиатора охлаждающего устройства, м<sup>2</sup>.

Коэффициенты теплопередачи теплообменных аппаратов можно представить как произведение степенных функций весовых скоростей теплоносителей в виде [1, 2]:

$$k = A \cdot u_1^p \cdot u_2^r, \quad (30)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – весовые скорости теплоносителей, м/с;

$A, p, r$  – постоянные эмпирические коэффициенты.

На основании изложенного можно сделать выводы:

1) рассмотренная математическая модель позволяет.

выполнить расчет тепловых параметров системы охлаждения тепловоза с перепуском воды из горячего контура в холодный;

оценить влияние  $G_K$  на изменение температуры воды в горячем и холодном контурах при различных начальных условиях;

2) полученные результаты требуют продолжения исследований в части анализа эффективности перепуска теплоносителя на всех режимах работы дизеля, определения пределов расхода теплоносителя на перепуск  $G_K$ , учета влияния изменяющихся параметров окружающей среды (температура воздуха, скорость ветра) и теплоносителей при различном техническом состоянии элементов системы охлаждения тепловозов и т. д.

## Список литературы

1. Луков, Н. М. Автоматическое регулирование температуры двигателей [Текст] / Н. М. Луков. – М.: Машиностроение, 1995. – 271 с.
2. Логинова, Е. Ю. Разработка системы связанного регулирования температур теплоносителей дизеля тепловоза: Дис... канд. техн. наук [Текст] / Е. Ю. Логинова / Московский ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 1984. – 178 с.
3. Горин, В. И. Охлаждающее устройство для современных тепловозов: каким ему быть? [Текст] / В. И. Горин // Локомотив. – 2014. – № 7. – С. 27 – 29.
4. Балагин, О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: Дис... канд. техн. наук [Текст] / О. В. Балагин / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2005. – 165 с.
5. Овчаренко, С. М. Математическое моделирование теплообменных процессов в системе охлаждения тепловоза [Текст] / С. М. Овчаренко, Д. В. Балагин, О. В. Балагин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 (23). – С. 38 – 44.

## References

1. Lykov N. M. *Avtomaticheskoe regulirovanie temperatury dvigatelei* (Automatic control of engines temperature). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1995. 271 p.
2. Loginova E. Yu. *Razrabotka sistemy svyazannogo regulirovaniia temperatur teplonositelei dizelia teplovoza* (Development systems of the connected regulation temperatures heat carriers of diesels locomotive) Doctor's thesis. Moscow, MSTU, 1984. 178 p.
3. Gorin V. I. *Okhlazhdaiushchee ustroistvo dlia sovremennykh teplovozoov: kakim emu byt'?* [The cooling device for modern locomotives: what to him to be?]. *Lokomotiv – The journal of Locomotive*, 2014. no. 7. pp. 27 – 29.
4. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo so-stoianiia seksii kholodil'nikov teplovoznnykh dizelei* (Development technologys of thermovision control technical conditions of sections refrigerators diesel diesels) Doctor's thesis. Omsk, OSTU, 2005. 165 p.
5. Ovcharenko S. M., Balagin D. V., Balagin O. V. Mathematical modeling of heatexchange processes in the locomotive cooling system [Matematicheskoe modelirovanie teploobennih processov v sisteme ohlazhdeniya teplovoza]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2015, no. 3 (23), pp. 38 – 44.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, ректор университета, заведующий кафедрой «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

### Балагин Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, помощник ректора по профессиональной ориентации и набору, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: BalaginOV@omgups.ru

### Балагин Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Doctor of Technical Sciences, rector, head of the department «Locomotives», (OSTU).

Phone: (3812) 31-34-17.

### Balagin Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. m Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, the assistant rectors on vocational guidance and a set, the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-72.

E-mail: BalaginOV@omgups.ru

### Balagin Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: BalaginDV@omgups.ru

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-72.

E-mail: BalaginDV@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчаренко, С. М. Повышение эффективности работы системы охлаждения тепловозов в эксплуатации [Текст] / С. М. Овчаренко, О. В. Балагин, Д. В. Балагин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 27 – 35.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S. M., Balagin O. V., Balagin D. V. Increase in overall performance locomotives cooling systems in operation. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 27 – 35. (In Russian).

УДК 621.423.1

**А. В. Плаксин<sup>1</sup>, С. В. Швецов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА РАВНИННЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Аннотация.** Расход электроэнергии на тягу зависит от большого числа эксплуатационных показателей, в том числе и от использования мощности электроподвижного состава. В связи с тем, что российские железные дороги характеризуются ярко выраженной неравномерностью участков пути, где наряду с холмисто-горным и горным профилем имеются и равнинные перегоны большой протяженности, электровозы при эксплуатации на разных по сложности участках пути имеют различную нагрузку, а следовательно, эксплуатируются и с разными энергетическими показателями.

Цель данной статьи – оценить энергетические показатели электровозов при вождении пассажирских поездов на равнинных участках пути и рассмотреть возможные пути повышения их энергетической эффективности.

Для достижения указанной цели был проведен анализ работы пассажирских электровозов ЭП2К на равнинном участке Новосибирск – Омск Западно-Сибирской железной дороги, определены средние значения скоростей движения и масс пассажирских поездов, для которых были рассчитаны мощность, коэффициент использования мощности и оценка экономичности работы электровозов.

На основании проведенного исследования было определено, что электровозы ЭП2К на равнинных участках железных дорог большой протяженности работают в неэкономичных режимах из-за их избыточной мощностью, которую невозможно реализовать. В связи с этим был сделан вывод о резервах экономии электроэнергии на тех участках железных дорог, где по условиям эксплуатации наблюдается явное недоиспользование мощности электровозов, предложен способ повышения эффективности их использования за счет применения ступенчатого регулирования мощности и произведена сравнительная оценка работы электровозов ЭП2К на всех и части тяговых двигателей.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, тяга поездов, пассажирский электровоз, постоянный ток, энергетические показатели, степень использования мощности, регулирование мощности.

**Alexey V. Plaksin<sup>1</sup>, Semen V. Shvetsov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

## WAYS TO REDUCE ELECTRIC POWER CONSUMPTION IN THE OPERATION OF LOCOMOTIVES ON FLAT SECTIONS OF RAILWAYS

**Abstract.** Electricity consumption for traction depends on a number of operational parameters, including the use of power of electric rolling stock. Due to the fact that the Russian Railways are characterized by pronounced uneven

sections of track, which, along with the hilly-mountain and mountain profile and has flat stretches long-haul locomotives when operating on different difficulty sections of the road have a different load and therefore operated with a different energy indicators.

The purpose of this study was to evaluate the energy performance of the electric locomotives for driving passenger trains on flat terrain and the possible ways to increase their energy efficiency.

To achieve this goal was the analysis of passenger electric locomotives EP2K on a flat site Novosibirsk-Omsk, West-Siberian railway, the mean values of the speeds and masses of passenger trains have been calculated for capacity, utilization factor, power rating and efficiency of electric locomotives.

On the basis of the conducted research it was determined that the EP2K electric locomotives in the plains of the Railways a large extent operate in inefficient modes, due to their excess capacity, which is impossible to implement. In this regard, it was concluded that reserves of energy saving in those areas of Railways, where the operating conditions there is a clear underutilization of the capacity of the locomotives, a method of increasing the efficiency of their use through the use of a stepped power control and comparative evaluation of EP2K electric locomotives on all parts and traction motors.

**Keywords:** energy efficiency, pull trains, passenger electric locomotives, direct current, energy performance, degree of power, the power regulation

Снижение расхода электроэнергии на тягу при соблюдении графиковых скоростей движения и масс поездов является одной из важнейших задач на железнодорожном транспорте, и данному вопросу уделяется повышенное внимание со стороны работников железных дорог, а также ученых и специалистов. За последние годы в этой области сделано многое, однако не все резервы еще использованы.

Так, в пассажирском движении электровозы ЭП2К эксплуатируются в настоящее время на участке от Мариинска до Самары на профиле пути, имеющем ярко выраженную неравномерность, где наряду с холмисто-горным и горным профилем имеются и равнинные перегоны большой протяженности. К равнинному профилю можно отнести весь участок от Новосибирска до Челябинска протяженностью 1400 км. Очевидно, что при работе локомотивов на разных по сложности участках пути они имеют и различную нагрузку, а следовательно, эксплуатируются и с разными энергетическими показателями.

Произведем оценку энергетических показателей электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на участке от Новосибирска до Омска, протяженность которого составляет более 600 км.

Оценить экономичность работы электровозов можно с помощью универсального энергетического показателя – коэффициента полезного действия (КПД). Для наглядности удобно воспользоваться универсальной характеристикой зависимости степени использования КПД электровоза  $C_{\text{КПД}}$  от коэффициента использования мощности  $K_p$ , которая приведена на рисунке 1.

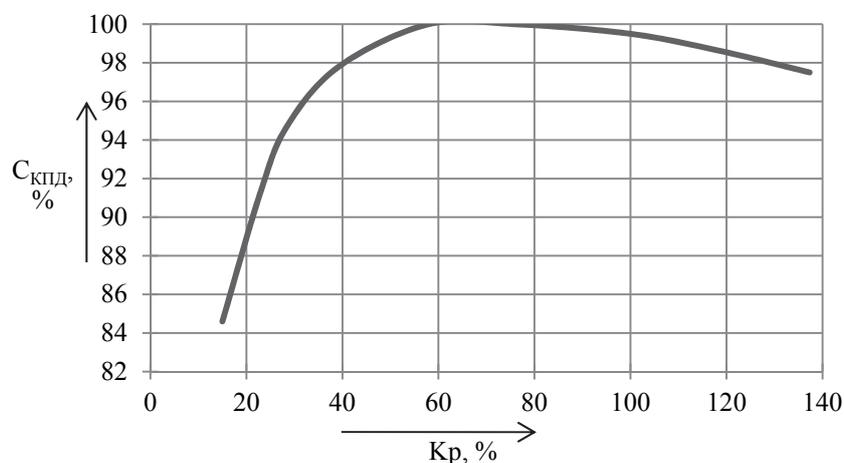


Рисунок 1 – Универсальная характеристика зависимости степени использования КПД электровоза от коэффициента использования мощности

Данная зависимость получена из табличных значений процентных характеристик [1], которые были аппроксимированы (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9985$ ) и приведены к следующему виду:

$$C_{\text{кпд}} = -2,9189 \cdot 10^{-11} \cdot K_p^6 + 1,9307 \cdot 10^{-8} \cdot K_p^5 - 5,1905 \cdot 10^{-6} \cdot K_p^4 + 7,2753 \cdot 10^{-4} \cdot K_p^3 - 5,6724 \cdot 10^{-2} \cdot K_p^2 + 2,3434 \cdot K_p + 60,03, \quad (1)$$

где  $C_{\text{кпд}}$  – степень использования КПД, определяемая как отношение КПД электровоза  $\eta_{\text{э}}$  к КПД электровоза в часовом режиме работы  $\eta_{\text{э,ч}}$  [1]:

$$C_{\text{кпд}} = \frac{\eta_{\text{э}}}{\eta_{\text{э,ч}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$K_p$  – коэффициент использования мощности, определяемый как отношение мощности локомотива на ободе колес  $P_{\text{к}}$  к аналогичной мощности в часовом режиме работы  $P_{\text{к,ч}}$  [1]:

$$K_p = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{к,ч}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Как видно из рисунка 1, степень использования КПД электровоза зависит от загруженности локомотива, и наибольшая его величина достигается при работе с мощностью, близкой к номинальной. Отклонение от номинального режима работы приводит к снижению энергетических показателей электровоза, в особенности при работе локомотивов с мощностью менее 20 % от номинальной. Данное утверждение подтверждается в работах, выполненных на эту тему [2 – 4].

Мощность на ободе колес локомотива определяется как [1]

$$P_{\text{к}} = \alpha \cdot V \cdot F, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – переводной коэффициент;

$V$  – скорость движения;

$F$  – сила тяги локомотива.

Силу тяги локомотива, необходимую для преодоления сил сопротивления движению поезда, определяют по формуле [5]:

$$F = m_{\text{л}}(w'_0 + w_i) + m_{\text{в}}(w''_0 + w_{\text{пр}} + w_i), \quad (5)$$

где  $m_{\text{л}}$  и  $m_{\text{в}}$  – массы локомотива и вагонов;

$w'_0$  и  $w''_0$  – основные удельные сопротивления движению электровоза и вагонов;

$w_{\text{пр}}$  и  $w_i$  – дополнительные удельные сопротивления движению от подвагонных генераторов и от уклона ( $w_i$  принимаем равным нулю).

Мощность на ободе колес электровоза в часовом режиме работы можно вычислить по формуле [1]:

$$P_{\text{к,ч}} = P_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{э,ч}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ч}}$  – мощность электровоза при часовом режиме работы.

С целью определения мощности, которую развивает электровоз при вождении поездов на равнинных участках пути, по данным автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машинистов (АС ЦОММ) была произведена выборка средних скоростей движения и масс пассажирских поездов на участках Новосибирск – Барабинск и Барабинск – Омск за 2013 – 2015 гг. (помесячно). Результаты выборки представлены в таблицах 1 – 2.

# Подвижной состав железных дорог

Таблица 1 – Среднемесячные значения средних технических скоростей движения и масс пассажирских поездов на участках Новосибирск – Барабинск и Барабинск – Омск в период 2013 – 2015 гг.

Период работы	Новосибирск – Барабинск						Барабинск – Омск					
	2015 год		2014 год		2013 год		2015 год		2014 год		2013 год	
	ско- рость, км/ч	масса поезда, т	ско- рость, км/ч	масса поезда, т	ско- рость, км/ч	масса поезда, т	ско- рость, км/ч	масса поезда, т	ско- рость, км/ч	масса поезда, т	ско- рость, км/ч	масса поезда, т
Январь	84,5	706	77,7	804	80,1	756	80,0	731	81,0	787	81,2	759
Февраль	85,9	635	78,2	723	79,9	757	79,7	684	81,4	691	81,0	705
Март	86,3	607	77,7	740	80,0	751	79,9	672	81,1	698	81,6	713
Апрель	86,5	597	78,6	748	81,2	781	80,1	675	80,9	694	81,4	729
Май	86,3	641	77,8	771	80,1	778	80,4	690	81,7	708	81,9	717
Июнь	86,4	663	82,4	815	77,9	810	79,9	735	79,3	793	82,2	780
Июль	86,5	731	83,3	816	78,3	866	79,8	802	80,4	836	81,4	850
Август	86,5	753	84,0	797	78,5	862	79,9	814	79,7	850	81,0	861
Сентябрь	86,0	681	83,4	760	78,3	791	80,0	733	80,0	753	81,2	780
Октябрь	85,7	647	83,5	731	78,8	771	80,2	706	80,1	716	81,7	754
Ноябрь	86,1	656	83,7	750	78,2	795	80,4	726	79,8	739	81,7	767
Декабрь	86,5	673	83,9	753	77,4	826	80,3	748	79,6	746	80,8	784
За год	86,1	667	81,2	767	79,0	795	80,0	726	80,4	751	81,4	766

Таблица 2 – Средние значения скоростей движения и масс пассажирских поездов на участке Новосибирск – Омск за 2013 – 2015 гг.

Период работы	Участок работы	Участковая скорость, км/ч	Техническая скорость, км/ч	Масса поезда, т
2015 год	Барабинск – Новосибирск	84,7	86,1	666
	Барабинск – Омск	77,6	80,0	731
	Новосибирск – Омск	81,1	83,1	699
2014 год	Барабинск – Новосибирск	80,0	81,4	768
	Барабинск – Омск	77,8	80,3	757
	Новосибирск – Омск	78,9	80,9	762
2013 год	Барабинск – Новосибирск	76,8	79,0	796
	Барабинск – Омск	78,7	81,4	772
	Новосибирск – Омск	77,8	80,2	784
Среднее значение за 2013 – 2015 гг.	Новосибирск – Омск	79,3	81,4	748

Анализ данных таблиц 1 – 2 показывает, что за период с 2013 по 2015 г. среднемесячные массы пассажирских поездов на участке от Новосибирска до Омска находились в пределах от 597 до 866 т, а среднемесячные технические скорости движения по участкам – 77,4 – 86,5 км/ч. При этом средняя масса поездов за данный период времени составила 748 т, а средняя техническая скорость – 81,4 км/ч.

Для оценки экономичности режимов работы электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на равнинных участках железной дороги для различных значений масс поездов и скоростей движения (до максимально разрешенных на данных участках) по формулам (1) – (6) были определены значения мощности, необходимой для преодоления равнинного участка пути, коэффициент использования мощности  $K_p$  и степень использования КПД  $C_{кпд}$ . Результаты расчетов представлены в таблице 3.

По данным таблицы 3 можно сделать вывод о том, что электровозам ЭП2К при вождении поездов массой от 600 до 870 т со скоростями движения 77 – 86 км/ч для преодоления равнинного профиля пути требуется развить мощность не более 1000 кВт, а среднее значение развиваемой локомотивом мощности в этих диапазонах масс и скоростей составляет 850 кВт. В связи с этим электровозы на равнинных участках пути используют свою мощность менее чем на 20 % от ее номинального (часового) значения и работают в неоптимальных по энергетике режимах со степенью использования КПД менее 95 %, т. е. режим их работы характери-

зуется дополнительными энергетическими затратами. Как видно из таблицы 3, только при вождении пассажирских поездов с максимально разрешенными или близкими к ним скоростями движения (140 км/ч) и массой поездов (1350 т) на Западно-Сибирской железной дороге степень использования КПД электровозов будет максимальной.

Таблица 3 – Значения мощности, необходимой для преодоления сил сопротивления движению поезда, коэффициента использования мощности и степени использования КПД электровозов ЭП2К

Масса поезда, т	Скорость движения, км/ч																	
	70			80			90			100			120			140		
	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>	P <sub>к</sub>	K <sub>р</sub>	C <sub>КПД</sub>
1350	1165	26,6	93,6	1392	31,8	95,9	1658	37,9	97,7	1968	44,9	98,9	2736	62,5	100,0	3727	85,1	99,9
1200	1046	23,9	92,0	1251	28,6	94,5	1491	34,0	96,6	1771	40,4	98,2	2464	56,3	99,8	3358	76,7	100,0
1000	888	20,3	89,5	1062	24,3	92,2	1268	29,0	94,7	1508	34,4	96,8	2101	48,0	99,3	2866	65,4	100,0
800	729	16,6	86,3	874	20,0	89,2	1045	23,9	92,0	1244	28,4	94,5	1738	39,7	98,1	2375	54,2	99,7
700	650	14,8	84,4	780	17,8	87,4	934	21,3	90,3	1113	25,4	92,9	1556	35,5	97,1	2129	48,6	99,3
600	571	13,0	82,4	686	15,7	85,3	822	18,8	88,2	981	22,4	91,0	1375	31,4	95,7	1883	43,0	98,7
400	412	9,4	77,6	498	11,4	80,3	600	13,7	83,2	718	16,4	86,1	1011	23,1	91,5	1391	31,8	95,9

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что электровозы ЭП2К на равнинных участках железных дорог большой протяженности работают в неэкономичных режимах из-за их избыточной мощности. В связи с этим имеются резервы экономии электроэнергии на тех участках железных дорог, где по условиям эксплуатации наблюдается недоиспользование мощности электровозов.

Основным путем повышения энергетических показателей электровозов ЭП2К при вождении пассажирских поездов на равнинных участках, на наш взгляд, является применение ступенчатого регулирования мощности за счет отключения отдельных тяговых двигателей (ТД) и увеличения суммарного КПД локомотивов.

В связи с тем, что в некоторых публикациях [6] указано, что «в общем случае мощность потерь энергии или КПД не определяют однозначно расход электроэнергии на тягу» и «методика решения задачи должна базироваться на оценке разности расхода электроэнергии для сравниваемых режимов», представляется целесообразным дополнительно оценить экономическую эффективность работы электровозов ЭП2К на всех и части ТД по разности расхода электроэнергии, которую можно получить по характеристикам электровозов.

Обычно паспортные тяговые характеристики для всех ступеней регулирования скорости изменением напряжения получают путем пересчетов на основании заданных характеристик для одного режима работы ТД в предположении независимости потерь в ТД и зубчатых передачах от величины напряжения на коллекторе [1, 6]. Такие расчеты могут привести к ошибкам, достигающим нескольких процентов. Более точно рассчитать характеристики можно на основании нагрузочных характеристик ТД и значений потерь [1]. Поскольку при отключении части ТД экономия электроэнергии может достигать нескольких процентов, расчет характеристик необходимо проводить по результатам испытаний ТД и рекомендациям ГОСТ 2582-81.

Расчет характеристик электровоза для всех ступеней регулирования скорости был выполнен по данным протокола испытаний ТД ЭД153У1 пассажирских электровозов ЭП2К [7] в соответствии с методикой [8] и рекомендациями ГОСТ 2582-81. За основу были приняты нагрузочные характеристики двигателя, полученные по результатам испытаний. В качестве примера приведена аппроксимированная зависимость нагрузочной характеристики двигателя ЭД153У1 при холостом ходе (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,999995$ ):

$$\frac{E}{n} = 8,7675 \cdot 10^{-13} \cdot (I_B)^5 + 1,6969 \cdot 10^{-9} \cdot (I_B)^4 - 8,5206 \cdot 10^{-7} \cdot (I_B)^3 - 2,3377 \cdot 10^{-4} \cdot (I_B)^2 + 0,3477 \cdot (I_B) + 1,0694, \quad (7)$$

где  $E$  – ЭДС ТД;

$n$  – частота вращения якоря ТД;

$I_b$  – ток возбуждения ТД.

Потери для различных нагрузочных режимов были определены следующим образом [8].

Электрические потери (потери в меди) в обмотках ТД

$$\Delta P_{д.эл.} = I_d^2 \cdot (r_{я} + r_{дп+ко} + \beta \cdot r_{гп}), \quad (8)$$

где  $I_d$  – ток ТД;

$r_{я}$ ,  $r_{дп+ко}$ ,  $r_{гп}$  – сопротивления обмоток якоря, компенсационной, добавочных и главных полюсов ТД;

$\beta$  – степень возбуждения ТД.

Магнитные (в стали) и добавочные потери в ТД

$$\Delta P_{д.(маг+д.)} = (1+k_d) \cdot \left(\frac{c\Phi}{c\Phi_n}\right)^2 \cdot \left(\frac{V}{V_n}\right)^{1,5} \cdot \Delta P_{д.маг.н.}, \quad (9)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток ТД;

$\Phi_n$  – номинальный магнитный поток ТД;

$c$  – конструктивная постоянная ТД;

$V_n$  – номинальная скорость движения электровоза;

$k_d$  – коэффициент добавочных потерь был аппроксимирован (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9999$ ) и приведен к следующему виду:

$$k_d = -0,0191 \cdot \left(\frac{I_d}{I_{д.н.}}\right)^3 + 0,201 \cdot \left(\frac{I_d}{I_{д.н.}}\right)^2 - 0,118 \cdot \left(\frac{I_d}{I_{д.н.}}\right) + 0,235, \quad (10)$$

где  $I_{д.н.}$  – номинальный ток ТД.

Механические потери в ТД

$$\Delta P_{д.мех.} = \left(\frac{V}{V_n}\right) \cdot \Delta P_{д.мех.н.} \quad (11)$$

Потери в контакте «щетка – коллектор» ТД электровоза

$$\Delta P_{д.эщ.} = \left(\frac{I_d}{I_{д.н.}}\right) \cdot \Delta P_{д.эщ.н.} \quad (12)$$

Значения потерь при номинальных режимах работы ТД – электрические ( $\Delta P_{д.эл.н.}$ ), магнитные ( $\Delta P_{д.маг.н.}$ ), механические ( $\Delta P_{д.мех.н.}$ ) и в щеточном контакте ( $\Delta P_{д.эщ.н.}$ ) были приняты согласно данным протокола испытаний ТД при номинальном режиме работы [7].

Потери в зубчатой передаче электровоза определялись в соответствии с рекомендациями ГОСТ 2582-81 и путем аппроксимации были приведены к зависимости КПД от отношения подведенной мощности  $P_d$  к номинальной  $P_{д.н.}$  (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9999$ ):

$$\eta_{зп} = 0,0275 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right)^6 + 0,1622 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right)^5 - 1,281 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right)^4 + 2,8893 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right)^3 - 3,0327 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right)^2 + 1,541 \cdot \left(\frac{P_d}{P_{д.н.}}\right) + 0,6616. \quad (13)$$

Полученные тяговые характеристики, а также значение сопротивления движению поезда массой 748 т на равнинном участке пути представлены на рисунке 2.

Анализ графиков на рисунке 2 наглядно показывает, что у электровозов ЭП2К существует область тяговых характеристик, где отсутствуют естественные характеристики и которая при вождении поездов массой 748 т находится в пределах 75 – 95 км/ч, что соответствует средним скоростям движения данных электровозов на рассматриваемых участках. Отсутствие естественных характеристик приводит к тому, что для поддержания заданной скорости в данном диапазоне скоростей движения машинисты чередуют движение на высшем соединении ТД с избыточным значением силы тяги – сериес-параллельном (СП) соединении, полном поле (ПП) с движением на низшем соединении ТД с недостаточным значением силы тяги – сериесном (С) соединении пятой ступени ослабления возбуждения (ОП5).

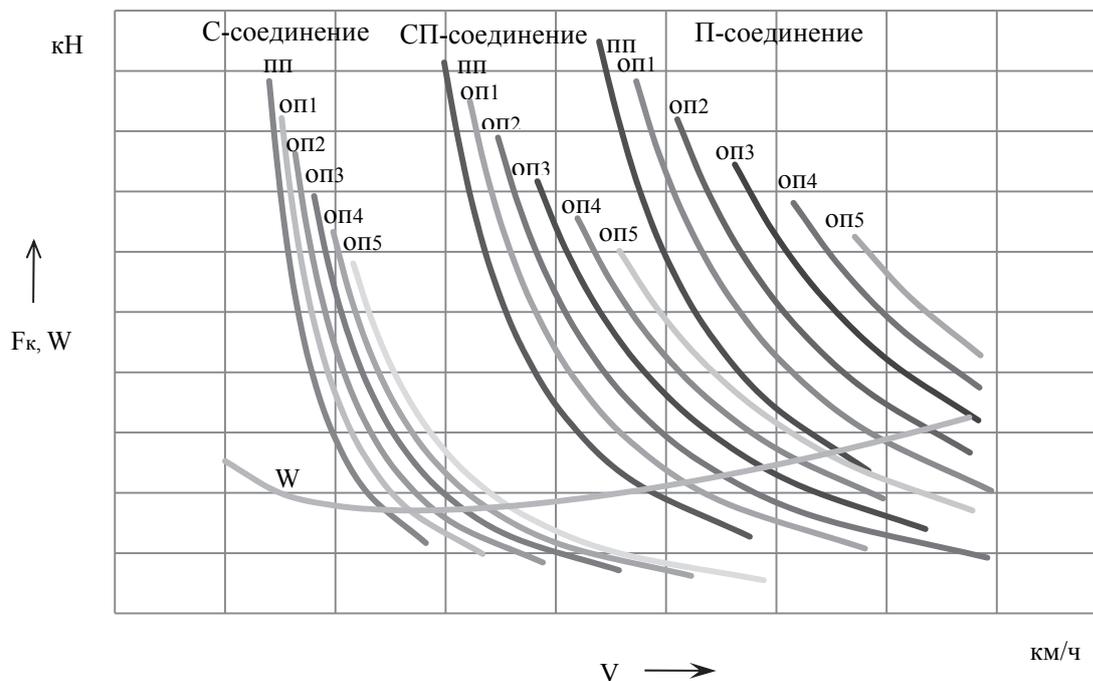


Рисунок 2 – Тяговые характеристики электровоза ЭП2К и значение сопротивления движению поезда массой 748 т на равнинном участке пути

Заполнить неперекрываемую область естественных характеристик и получить дополнительные характеристики можно путем отключения 3 ТД (одной ветки) на СП-соединении электровоза. На рисунке 3 приведены дополнительные характеристики при работе электровоза на 3 ТД на СП-соединении, которые были получены как  $F_{3д} = F_{6тд} / 2$ .

По полученным характеристикам было проведено сравнение работы электровозов на всех и части ТД. В работе [6] приведена методика, где проводится сравнение близких по значениям скорости и силы тяги режимов работы электровоза постоянного тока на всех и части ТД и производится оценка снижения расхода электроэнергии по формуле:

$$\Delta a^* = \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad (14)$$

где  $a_1, a_2$  – удельные (отнесенные к 1 ткм или 1 поездо-км перевозочной работы) расходы электроэнергии на тягу на данном участке, определяемые как

$$a_1 = \frac{10^3 \cdot P_{\text{г1}}}{V_1 \cdot (m_{\text{л}} + m_{\text{в}})}; \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{10^3 \cdot P_{\text{г2}}}{V_2 \cdot (m_{\text{л}} + m_{\text{в}})}, \quad (16)$$

где  $P_{s1}$  и  $P_{s2}$  – значения потребляемых из сети мощностей сравниваемых вариантов;  
 $V_1$  и  $V_2$  – значения скоростей движения сравниваемых вариантов.

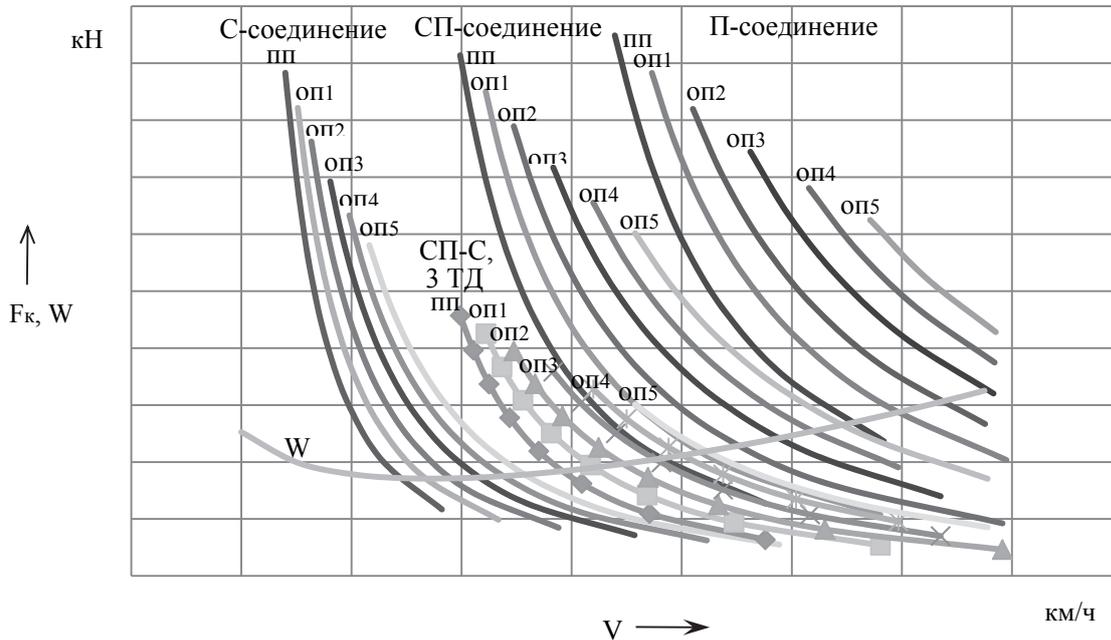


Рисунок 3 – Тяговые и дополнительные характеристики электровоза ЭП2К и сопротивление движению поезда массой 748 т на равнинном участке пути.

Стоит отметить, что потребляемая из сети мощность так же, как и удельный расход электроэнергии, зависят от скорости движения электровоза. Так, потребляемую из сети мощность можно представить как [1]

$$P_s = \frac{\alpha \cdot V \cdot F}{\eta_s} = \frac{\alpha \cdot V \cdot [m_n (w'_0 + w_i) + m_b (w''_0 + w_{пр} + w_i)]}{\eta_s}, \quad (17)$$

тогда удельный расход электроэнергии на тягу

$$a = \frac{\alpha \cdot [m_n (w'_0 + w_i) + m_b (w''_0 + w_{пр} + w_i)]}{\eta_s \cdot (m_n + m_b)}. \quad (18)$$

Расчет, проведенный по формуле (18), показывает, что при вождении электровозом ЭП2К пассажирского поезда массой 748 т со скоростью движения 97 км/ч удельный расход электроэнергии на тягу составит 14,98 кВт·ч/ткм, а при вождении со скоростью 98 км/ч – 15,09 кВт·ч/ткм. Расчет выполнялся в сопоставимых условиях при одинаковом значении КПД электровоза. Таким образом, отклонение скорости движения всего на 1 км/ч приводит к изменению удельного расхода электроэнергии на 0,11 кВт·ч/ткм, или 0,7 %, что является весьма ощутимой величиной, так как экономия электроэнергии при частичном отключении ТД может составлять единицы или даже доли процента.

В связи с этим представляется более объективным при сравнении вариантов (на всех и на части ТД) рассмотреть работу электровоза не в одном близком к заданной скорости движения режиме, а наиболее приближенно к условиям эксплуатации, где для поддержания заданной скорости движения избыток тяги можно компенсировать движением с меньшим значением силы тяги и определить удельный расход электроэнергии пропорционально времени работы в каждом из режимов, тем более что современная вычислительная техника позволяет рассчитать характеристики электровоза для заданной скорости движения.

Оценка сравниваемых вариантов была произведена путем выполнения тяговых расчетов по следующей методике.

Проинтегрировав уравнение движения поезда по пути с использованием разложения функции  $V(S)$  в ряд Тейлора [1]

$$V(S + \Delta S) = V(S) + \Delta S \frac{\Delta V}{\Delta S} + \frac{\Delta S^2}{2} \frac{\Delta^2 V}{\Delta S^2} \quad (19)$$

при условии  $\frac{\Delta S^2}{2} \cdot \frac{\Delta^2 V}{\Delta S^2} = 0,1 \div 0,5$  км/ч был определен путь, проходимый электровозом при заданной средней скорости движения в каждом режиме:

$$\Delta S_1 = \frac{V_{cp} \cdot \Delta V}{\xi \cdot f_y} \quad \text{и} \quad \Delta S_2 = \frac{V_{cp} \cdot \Delta V}{\xi \cdot f_3} \quad (20)$$

и время работы электровоза в каждом из режимов:

$$\Delta t_1 = \frac{60 \cdot \Delta V}{\xi \cdot f_y}; \quad \Delta t_2 = \frac{60 \cdot \Delta V}{\xi \cdot f_3}, \quad (21)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость движения;

$\Delta V$  – интервал изменения скорости движения;

$\xi$  – ускорение поезда;

$f_y, f_3$  – удельные ускоряющие и замедляющие усилия электровоза в соответствующем режиме работы, определяемые по формуле [5]:

$$f_y = \frac{F_{к1}}{m_{л} + m_{в}} - w_0; \quad f_3 = \frac{F_{к2}}{m_{л} + m_{в}} - w_0, \quad (22)$$

где  $F_{к1}, F_{к2}$  – значения сил тяг электровоза в соответствующих режимах работы.

Основное удельное сопротивление движению поезда с учетом увеличения потерь в зубчатой передаче при отключении части ТД, которые можно определить как [1]

$$\Delta P_{xx} = \frac{K \cdot (w_x - w'_0) \cdot V \cdot m_{л}}{N + K} \quad (23)$$

было приведено к виду:

$$w_0 = \left( \left( \frac{w'_0 \cdot N + w_x \cdot K}{N + K} \right) m_{л} + \frac{(w''_0 + w''_{пр}) \cdot m_{в}}{(m_{л} + m_{в})} \right), \quad (24)$$

где  $w_x$  – основное удельное сопротивление движению электровоза без тока;

$K$  – число отключенных ТД;

$N$  – число ТД, участвующих в режиме тяги.

По характеристикам электровоза и вычисленным значениям пути и времени работы в каждом из режимов был определен удельный расход электроэнергии на единицу пути для каждого из вариантов работы электровоза по формуле:

$$a^* = \frac{P_{э.1р} \cdot \Delta t_1 + P_{э.2р} \cdot \Delta t_2}{60000 \cdot (\Delta S_1 + \Delta S_2)(m_{л} + m_{в})}, \quad (25)$$

где  $P_{э.1р}$  и  $P_{э.2р}$  – значения потребляемых из сети мощностей при соответствующих режимах работы.

Оценка разницы расхода электроэнергии сравниваемых вариантов (на всех и части ТД) была произведена по формуле (14), которая с учетом преобразований была приведена к виду:

$$\Delta a^* = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 (P_{\text{э.части ТД } i} \cdot \Delta t_{\text{части ТД } i}) \cdot \sum_{i=1}^2 (\Delta S_{\text{всех ТД } i})}{\sum_{i=1}^2 (P_{\text{э.всех ТД } i} \cdot \Delta t_{\text{всех ТД } i}) \cdot \sum_{i=1}^2 (\Delta S_{\text{части ТД } i})} \right), \quad (26)$$

где  $\Delta t_{\text{всех ТД } i}$ ,  $\Delta t_{\text{части ТД } i}$  – время работы электровоза на всех и части ТД в каждом из режимов работы;

$\Delta S_{\text{всех ТД } i}$ ,  $\Delta S_{\text{части ТД } i}$  – путь, проходимый электровозом на всех и части ТД в каждом из режимов работы;

$P_{\text{э.всех ТД } i}$ ,  $P_{\text{э.части ТД } i}$  – значения мощностей потребляемых из сети в каждом режиме работы электровоза на всех и части ТД определяемых как

$$P_{\text{э},i} = N_i \cdot I_{\text{ТД } i} \cdot U_{\text{ТД } i}, \quad (27)$$

где  $N_i$  – число ТД, участвующих в тяге, в соответствующем режиме работы;

$I_{\text{ТД } i}$  – ток одного ТД в соответствующем режиме работы;

$U_{\text{ТД } i}$  – напряжение одного ТД в соответствующем режиме работы.

Результаты сравнения экономичности электровозов ЭП2К при работе на всех и на 3 ТД на СП-соединении приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Анализ работы электровозов ЭП2К на всех и части ТД (3 ТД на СП-соединении)

Средняя скорость движения $V$ , км/ч	Масса вагонов $M_v$ , т	Соединение тяговых двигателей / величина ослабления поля, %	Ток одного ТД $I_{\text{ТД } i}$ , А	Сила тяги одного колесно-моторного блока (КМБ) $F_{\text{к.о.б}}$ , кН	Число работающих ТД $N_i$	Путь, проходимый электровозом при $\Delta V = 1$ км/ч $\Delta S_i$ , км	Время работы электровоза $\Delta t_i$ , мин	Удельный расход электроэнергии а, кВт·ч/ткм	Процент снижения расхода электроэнергии $\Delta a^*$ , %
99,158	780	СП-ОП1 / 80 %	254,0	7,922	6	9,395	5,685	15,574	4,276
		СП-ПП / 100 %	204,39	6,157	6	5,582	3,377		
99,158	780	СП-ОП5 / 40 %	504,515	16,553	3	6,931	4,194	14,909	5,374
		СП-ОП4 / 46 %	442,06	14,476	3	42,129	25,492		
96,04	720	СП-ПП / 100 %	214	6,708	6	86,915	54,3	15,502	5,374
		С-ОП5 / 40 %	215	2,989	6	1,531	0,956		
96,04	720	СП-ОП1 / 85 %	462,5	15,65	3	5,251	3,28	14,669	5,197
		СП-ПП / 100 %	397,19	13,369	3	74,056	46,264		
92,551	780	СП-ПП / 100 %	226,0	7,416	6	12,042	7,806	15,082	5,197
		С-ОП5 / 40 %	224,07	3,256	6	1,568	1,016		
92,551	780	СП-ОП3 / 54 %	419,21	14,674	3	20,034	12,988	14,298	6,31
		СП-ОП2 / 66 %	346,2	11,978	3	5,44	3,527		
80,495	780	СП-ПП / 100 %	282,5	10,99	6	1,101	0,821	14,364	6,31
		С-ОП-5 / 40 %	262,145	4,493	6	2,584	1,926		
80,495	780	СП-ОП1 / 85 %	349,68	13,905	3	11,991	8,938	13,457	6,865
		СП-ПП / 100 %	282,5	10,99	3	4,829	3,60		
75,368	840	СП-ПП / 100 %	318,2	13,386	6	0,746	0,594	14,10	6,865
		С-ОП5 / 40 %	282,5	5,228	6	3,454	2,749		
75,368	840	СП-ОП1 / 85 %	392,94	16,804	3	3,072	2,445	13,132	6,865
		СП-ПП / 100 %	318,2	13,386	3	63,06	50,202		

Из анализа данных таблицы 4 можно сделать вывод о том, что при вождении электровозами ЭП2К пассажирских поездов массой 720 – 840 т (12 – 14 вагонов) со скоростями дви-

жения от 75 до 100 км/ч при отключении 3 ТД расход электроэнергии может быть снижен на 4 – 6,5 %. Отключение ТД рекомендуется производить при движении электровоза на СП-соединении (отключать 3 ТД), что позволит осуществлять движение в области отсутствия естественных характеристик электровоза. При отключении части ТД на данном соединении для поддержания заданной скорости движения в пределах 75 – 96 км/ч машинисту не нужно будет переходить с высшего соединения (СП-ПП) на низшее (С-ОП5), что также позволит снизить колебания тяговой нагрузки, которые приводят к увеличению потерь в контактной сети и уменьшить число коммутаций в цепи электровоза [9]. Кроме этого при отключении 3 ТД на СП-соединении появляется возможность чередования работы электровоза по группам ТД, участвующих в тяговом режиме (при соответствующих преобразованиях в цепях можно эксплуатировать электровоз сначала на одной, а затем на другой группе ТД), а также избежать излишнего (ненужного) переключения контакторов при сбросе и наборе позиций при переходе с СП-соединения ПП на С-соединение ОП5 [10].

Существует мнение, что отключение отдельных ТД может привести оставшиеся в работе движущие оси к нагрузкам, предельным по сцеплению. На самом деле это не так. Расчетами было установлено (рисунок 4), что режим отключения 3 ТД электровоза осуществляется с силами тяги колесно-моторных блоков  $F_{ко} = F_k / N$ , значительно меньшими, чем сила тяги по сцеплению  $F_{к.сц.о}$ .

Оценивая значения  $F_{ко}$  для режима работы электровоза на части двигателей, можно заключить, что они составляют величину примерно 0,35 от сил, предельных по сцеплению при эксплуатации электровоза на равнинном участке пути (см. рисунок 4).

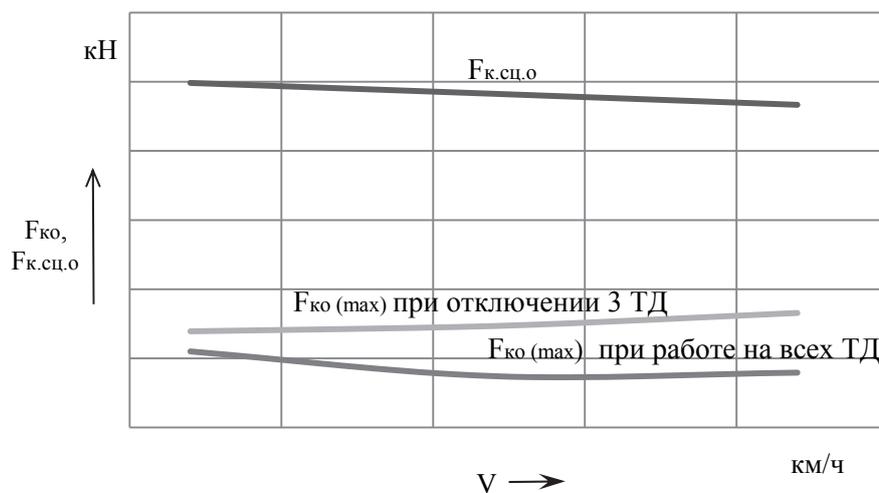


Рисунок 4 – Значения ограничения по сцеплению и сил тяг, развиваемых одним колесно-моторным блоком при работе электровоза на всех и части ТД

Проведенная оценка снижения расхода электроэнергии позволяет сделать вывод об имеющихся резервах повышения энергетической эффективности электровозов ЭП2К при эксплуатации на равнинных участках пути. Небольшие изменения силовой схемы и схемы цепей управления позволят без серьезных затрат провести эксперимент по отключению части ТД.

### Список литературы

1. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
2. Бабич, В. М. Повышение энергетической эффективности электровозов: Учебное пособие [Текст] / Омская гос. акад. путей сообщения. – Омск, 1995. – 112 с.

3. Андриющенко, А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом [Текст] / А. А. Андриющенко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Известия ПГУПС / ПГУПС. – Санкт-Петербург. – 2015. – № 4. – С. 5 – 14.
4. Плаксин, А. В. Об использовании мощности пассажирских электровозов на участке Исилькуль – Инская [Текст] / А. В. Плаксин // Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 1999. С. 57 – 61.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Гетьман, Г. К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава [Текст] / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Наука та прогресс транспорту // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Дніпропетровськ, 2013. – № 5 (47).
7. Протокол предварительных испытаний электродвигателя тягового постоянного тока ЭД153У1 для пассажирского электровоза ЭП2К. ТХ.218.1022 / Завод «Электротяжмаш». – Харьков, 2007. – 36 с.
8. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей: Учебник [Текст] / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
9. Бабич В. М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В. М. Бабич, А. Н. Крыгин // Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране: Тезисы докл. всесоюзной науч.-техн. конф. / Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкторский ин-т электровозостроения. – Новочеркасск, 1991. – С. 12, 13.
10. Саблин О. И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения [Текст] / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2012. – № 6/8. – С. 34 – 38.

## References

1. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Transport, 1983, 328 p.
2. Babich V. M. *Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti jelektrovozov: Uchebnoe posobie* (Improving the energy efficiency of locomotives: textbook). Omsk: OSTU, 1995, 112 p.
3. Andryushchenko A. A., Zarifian 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.
4. Plaksin, A. V. *Ob ispolzovanii moshchnosti passazhirskikh elektrovozov na uchastke Isilkul – Inskaya* (About using the power of the locomotives in the area of Isil'kul' – Inskaya). Increase traction and energy efficiency and reliability of electric rolling stock, Omsk, 1999. pp. 5761.
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.
6. Getman, G. K. *Vasilyev V. E. Eshhe raz ob opredelenii jekonomii jelektrojenergii na tjagu za schet chastichnogo otkljuchenija tjagovykh dvigatelej jelektropodvizhnogo sostava* (Again about the definition of saving of electrical energy for traction due to partial disconnection of traction motors of electric rolling stock). *Nauka ta progress transport. Visnyk national transport University salbnikova*, 2013, no. 5 (47).
7. *Protokol predvaritel'nyh ispytaniy jelektrodvigatelja tjagovogo postojannogo toka JeD153U1 dlja passazhirskogo jelektrovoza JeP2K. TH.218.1022* (Protocol preliminary testing of the traction motor DC ЭД153У1 for passenger electric locomotive EP2K. ТХ.218.1022), State enterprise plant «Electrotyazhmash», Kharkov, 2007 – 36 p.
8. Kurbatov A. S., Sedov V. I., Sorin L. N. *Proektirovanie tjagovykh jelektrodvigatelej. Ucheb- nik* (Design of traction motors. The Textbook). – Moscow: Transport, 1987. – 536 p.

9. Babich, V. M., Krygin A. N. Optimal'noe regulirovanie moshhnosti mnogoosnogo scepa v tjage Tezisy dokladov «Sostojanie i perspektivy razvitija jelektrovozostroenija v strane (Optimal power control of multi-axis coupling gear in the thrust) Abstracts of the «State and prospects of development of electric locomotive engineering in the country». Novocherkassk, 1991б pp. 12 – 13.

10. Sablin O. I., Artemchuk V. V. *Snizhenie izbytochnoj moshhnosti tjagovogo sredstva v processe dvizhenija* (Reduction of excess capacity of the traction means in motion). East European journal of advanced technologies, Kharkov, 2012, no. 6/8. – pp. 34 – 38.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Плаксин Алексей Владимирович

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

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

Ведущий инженер Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

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 снижения расхода электрической энергии 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. – № 1 (29). – С. 35 – 47.

## 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 the West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

### Shvetsov Semen Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation. Candidate 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

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Ways to reduce electric power consumption in the operation of locomotives on flat sections of Railways. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 35 – 47. (In Russian).

УДК 621.313

## В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков

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

## АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЩЕТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Аннотация.* В данной статье приведены обобщенные результаты исследований изменения интенсивности изнашивания электрических щеток тяговых электродвигателей электровозов. На основании проведенных исследований сформирован алгоритм для прогнозирования ресурса работы щеток с учетом параметров режима работы электродвигателей. С целью повышения достоверности расчета составлены алгоритмы, позволяющие дополнительно учесть воздействие микрогеометрии коллектора на процесс работы щетки.

*Ключевые слова:* машина постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, щетка, износ, прогнозирование.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Marsel F. Baysadykov  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

## THE ALGORITHM OF FORECASTING OF RESOURCE OF ELECTRIC BRUSHES TRACTION MOTORS

**Abstract.** In this article the generalized results of researches of change of intensity of wear of electrical brushes in the traction motors of electric locomotives. On the basis of the conducted research the author proposes an algorithm to predict the operating life of the brushes, given the parameters of the operation. In order to increase the reliability of the calculation has been developed algorithms, which allow additionally taking into account the effect of the collector's surface.

**Keywords:** DC machine, commutator-brush assembly, brush, wear, prediction.

Несмотря на сформировавшуюся тенденцию по сокращению числа эксплуатируемых машин постоянного тока (МПТ) и переходу на бесколлекторные двигатели, МПТ по-прежнему находят широкое применение, в том числе и на железнодорожном транспорте, например, в качестве тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов, как старого образца, так и на современных электровозах.

Работа МПТ в качестве ТЭД подвижного состава сопряжена с нагрузками, связанными как с режимом ведения поезда, так и с условиями окружающей среды. Одним из элементов МПТ, наиболее подверженных их воздействию, является коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Согласно статистике на долю КЩУ приходится порядка 25 % от общего числа отказов ТЭД.

Главной причиной выхода из строя ТЭД является нарушение процесса коммутации, одной из причин нарушений которого является нестабильность работы контакта «щетка – коллектор», вызывающая повышенный износ элементов КЩУ.

При работе ТЭД износу в большей степени подвержена электрическая щетка. Процесс ее работы сопровождается воздействием большого числа факторов как механической, так и электрической природы. В связи с этим остается актуальной задача по мониторингу и своевременному предупреждению выхода из строя элементов КЩУ.

Широкий анализ наиболее значимых научных работ в этой области проведен в работе [1], где рассмотрены различные подходы к расчету интенсивности изнашивания щеток исходя из экспериментальных и справочных данных, а также параметров режима работы двигателя.

Большинство исследователей [1 – 6], занимающихся данным вопросом, сходятся на том, что износ щеток можно разделить на три составляющих:

- 1) фрикционная  $\Delta I_{\text{ф}}$  – обусловленная механическими параметрами работы двигателя;
- 2) электрокоррозионная  $\Delta I_{\text{эк}}$  – обусловленная протеканием тока по щетке во время работы двигателя;
- 3) электроэрозионная  $\Delta I_{\text{эр}}$  – обусловленная наличием искрения в точке контакта щетки и коллектора.

Таким образом, формула для определения износа щетки  $\Delta I$  может быть записана в виде:

$$\Delta I = \Delta I_{\text{ф}} + \Delta I_{\text{эк}} + \Delta I_{\text{эр}}. \quad (1)$$

Анализ работ [1, 4 – 6], в которых исследуются вопросы расчета составляющих износа щеток, показывает, что выражение (1) можно свести к виду:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = (n \cdot P_{\text{ср.щ}}) \cdot K_{\text{ф}} + (n^{\frac{3}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot P_{\text{ср.щ}}^{\frac{1}{2}}) \cdot K_{\text{эк}} + (n \cdot W_{\text{и}}) \cdot K_{\text{эр}}, \quad (2)$$

где  $t$  – время, ч;

$n$  – частота вращения двигателя, об/мин;

$P_{\text{ср.щ}}$  – среднее значение давления на щетку;

$I$  – ток, протекающий по щетке, А;  
 $W_{и}$  – энергия искрения, усл. ед.;  
 $K_{ф}$  – коэффициент фрикционного износа;  
 $K_{эж}$  – коэффициент электрокоррозионного износа;  
 $K_{эр}$  – коэффициент электроэрозионного износа.

Выражение (2) имеет переменные, определяемые режимом работы щеточного контакта  $n$ ,  $P$ ,  $W_{и}$ ,  $I$ , и постоянные коэффициенты, не зависящие от режима работы,  $K_{ф}$ ,  $K_{эж}$ ,  $K_{эр}$ . В литературе предлагаются различные подходы к определению данных коэффициентов. Часть параметров, необходимых для их вычисления, предлагается определять по справочникам, в которых часто приводятся достаточно широкие диапазоны значений параметра, что вносит значительную погрешность в расчет. Остальные параметры должны оцениваться целым рядом специальных измерительных приборов, что делает процесс их определения трудоемким и дорогостоящим.

Для повышения точности и упрощения процесса определения интенсивности износа щетки авторами разработан следующий алгоритм, позволяющий прогнозировать ресурс работы щетки с учетом параметров режима работы ТЭД (рисунок 1).

Данный алгоритм условно можно разделить на несколько этапов.

На первом этапе вводятся параметры щетки, такие как ее масса  $m_{щ}$ , высота  $l_{щ}$  и ширина  $b_{щ}$ . Эти значения являются достаточно легко измеряемыми.

Второй этап данного алгоритма служит для ввода коэффициентов  $K_{ф}$ ,  $K_{эж}$ ,  $K_{эр}$ . Следует обратить внимание на то, что коэффициенты обусловлены параметрами материала конкретного типа щетки и двигателя, на котором они установлены. В связи с тем, что параметры материала остаются величиной постоянной, можно принять, что  $K_{ф}$ ,  $K_{эж}$ ,  $K_{эр}$  также являются постоянными.

При работе с алгоритмом возможно возникновение двух ситуаций. В первом случае данные коэффициенты могут быть уже известны, если для данного типа двигателя и щеток уже были проведены необходимые опыты для их определения.

Во втором случае необходимо рассчитать данные коэффициенты. Для этого проводят серию экспериментальных исследований, состоящую как минимум из трех опытов, в которых за равные промежутки времени необходимо измерить износ, обусловленный только фрикционной составляющей, одновременно фрикционной и электрокоррозионной составляющими, а также сразу тремя составляющими. При проведении экспериментальных исследований по определению интенсивности износа щеток все опыты проводятся в течение одинакового промежутка времени  $\Delta t$  в следующем порядке.

Для измерения интенсивности изнашивания, обусловленной фрикционной составляющей, необходимо обеспечить вращение двигателя без тока в течение заданного времени  $\Delta t$  при неизменной величине нажатия на щетки  $P_{ср.щ}$  и частоте вращения  $n$ . В результате полученных значений  $\Delta I$  можно произвести расчет  $K_{ф}$  по выражению:

$$K_{ф} = \frac{n \cdot P_{ср.щ} \cdot \Delta t}{\Delta I} \quad (3)$$

1) Для определения коэффициента  $K_{эж}$  требуется проведение экспериментального исследования, также при неизменных  $P_{ср.щ}$  и  $n$ , но в данном случае необходимо обеспечить протекание тока  $I$  по щетке и полное отсутствие искрения под щетками. Стоит отметить, что ток, протекающий по щетке, ведет к изменению коэффициента трения  $f_{тр}$ , но при этом следует заметить, что при нормальной влажности воздуха это влияние незначительно [3, 4], в связи с чем можно принять  $f_{тр} = \text{const}$ . Расчет  $K_{эж}$  производится по формуле:

$$K_{эж} = \frac{\Delta I}{\Delta t} - \frac{n \cdot P_{ср.щ} \cdot K_{ф}}{n^{\frac{3}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot P_{ср.щ}^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

2) Определение коэффициента  $K_{эр}$  происходит при наличии искрения в точке контакта «щетка – коллектор». Уровень искрения задается исследователем путем подпитки и отпитки добавочных полюсов. При этом необходимо производить объективную оценку энергии искрения  $W_{и}$  для двигателя, для чего может быть использован, например, прибор контроля коммутации, разработанный в ОмГУПСе на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» [7]. Определение  $K_{эр}$  производится по формуле:

$$K_{эр} = \frac{\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right) - (n \cdot P_{ср.щ.}) \cdot K_{\phi} - \left(n^{\frac{3}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot P_{ср.щ.}^{\frac{1}{2}}\right) \cdot K_{\phi}}{n \cdot W_{и}} \quad (5)$$

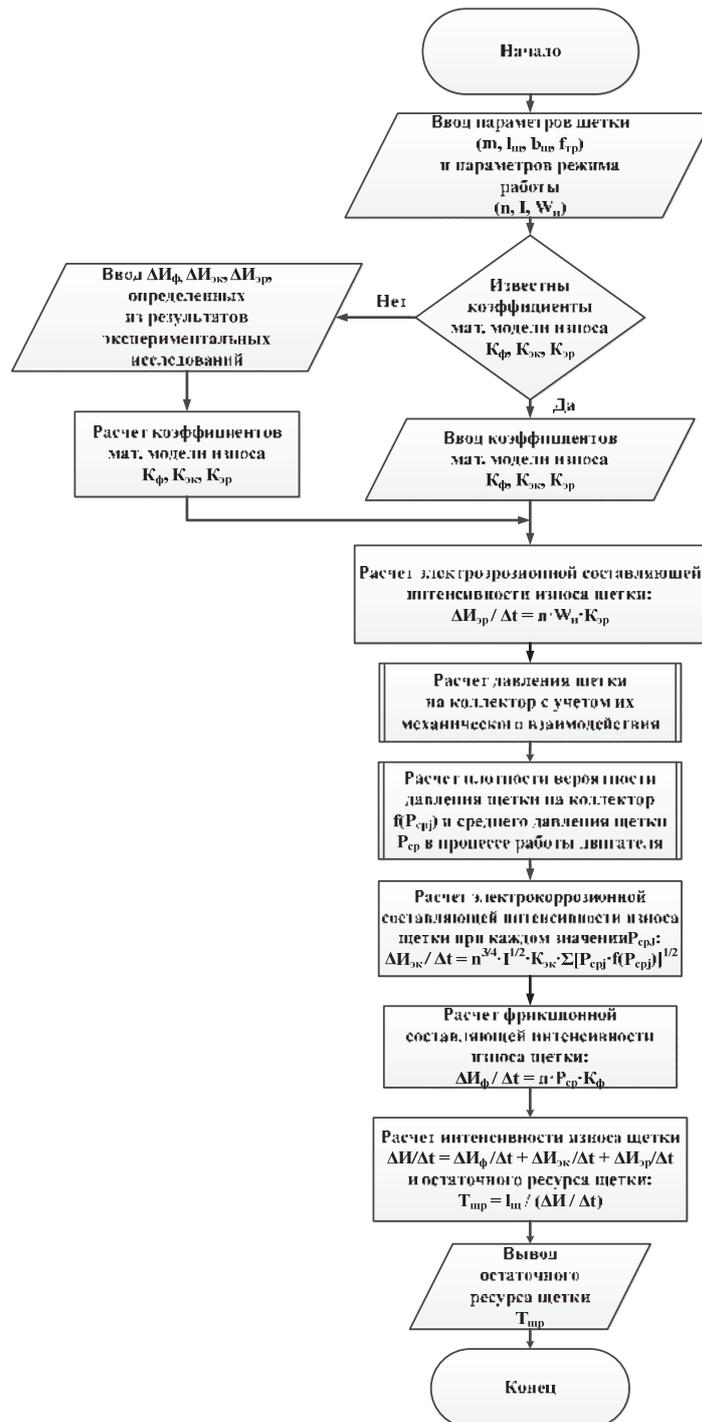


Рисунок 1 – Алгоритм расчета ресурса работы щетки

На третьем этапе алгоритма производится расчет составляющих интенсивности изнашивания щетки  $\Delta I_{\text{ф}}$ ,  $\Delta I_{\text{эк}}$ ,  $\Delta I_{\text{эр}}$ .

Для расчета электроэрозионной составляющей износа  $\Delta I_{\text{эр}}$  необходимо знать два параметра работы двигателя: частоту вращения  $n$  и энергию искрения  $W_{\text{и}}$ , которую необходимо измерить тем же оборудованием и в тех же единицах измерения, как это описано выше при определении  $K_{\text{эр}}$ .

Далее определяется электрокоррозионная составляющая износа  $\Delta I_{\text{эк}}$ , которая нелинейно зависит от силы нажатия щетки на коллектор и зависит от динамического воздействия его профиля на движение щетки.

Ввиду того, что величина силы, действующей на щетку со стороны коллектора, не является постоянной величиной и в процессе работы двигателя подвергается постоянным колебаниям [8], влияющим на интенсивность износа щетки, для повышения достоверности расчета необходимо учитывать механическое воздействие микрогеометрии коллектора на величину данной силы. Данное воздействие предлагается оценивать по расчетной величине упругой силы в контакте  $P_{\text{к}}$ , используя математическую модель, представленную в работе [9]. Упрощенный вид алгоритма расчета по определению величины  $P_{\text{к}}$  показан на рисунке 2.

Порядок расчета упругой силы в контакте  $P_{\text{к}}$  состоит в следующем: после ввода параметров щетки и двигателя, принятых для расчета, происходит ввод числа точек расчета  $N_{\text{т}}$  и данных по профилю коллектора  $\eta_{\text{к}}$ . Ввиду того, что контакт щетки возможен одновременно с несколькими коллекторными пластинами и зависит от щеточного перекрытия, необходимо механическое воздействие со стороны коллектора на щетку определять для каждой коллекторной пластины. Для учета этого необходимо знать номера коллекторных пластин, находящихся под щеткой в текущий момент времени, и степень их перекрытия  $b_{\text{ки}}$ . Для расчета упругой силы необходимо знать значение силы, с которой щетка давит на коллекторную пластину. Это значение зависит от величины линейной деформации пластины коллектора под щеткой  $\delta_{\text{ки}}$ , определяемой как разница между текущей координатой щетки и высотой пластины коллектора. Расчет упругой силы  $P_{\text{ки}}$  определяется как произведение величины линейной деформации на коэффициент упругости материала коллектора  $c_{\text{к}}$ . В результате расчета получаем значения силы  $P_{\text{к}}$ , возникающей в точке контакта щетки с коллектором во время работы двигателя.

На рисунке 3 приведены фрагменты графика движения щетки по участку коллектора и график изменения упругой силы в зоне контакта «щетка – коллектор», полученный из математической модели для двигателя ПЗ1М при следующих условиях работы: нажатие на щетку – 2,4 Н; частота вращения двигателя – 2840 об/мин; масса щетки с учетом приведенной массы рычага щеткодержателя – 25 г; коэффициент трения в контакте «щетка – коллектор» для пары поверхностей скольжения «графит – медь» – 0,1 [10].

Для определения электрокоррозионной составляющей износа  $\Delta I_{\text{эк}}$  предлагается проводить расчет в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 4. Сначала вводятся данные по моделированию взаимодействия элементов КЩУ, полученные из алгоритма, представленного на рисунке 2. Затем из массива полученных значений  $P_{\text{к}}$  выбирается максимальное значение, служащее для определения числа интервалов  $m$ , на которые будут разделены результаты расчета упругой силы (можно задать вручную, скорректировав точность и длительность расчета) и границ данных интервалов. Далее определяется вероятность попадания  $P_{\text{ки}}$  в каждый интервал путем подсчета точек, попавших в его границы. После этого определяется среднее значение нажатия для каждого интервала.

Пример расчета распределения давления в точке контакта «щетка – коллектор»  $P_{\text{к}}$  приведен на рисунке 5. В итоге происходит подсчет электрокоррозионной составляющей износа  $\Delta I_{\text{эки}}$  для средней величины нажатия каждого интервала и с учетом соответствующих вероятностей определяется полная величина электрокоррозионной составляющей износа  $\Delta I_{\text{эк}}$ .



Рисунок 2 – Алгоритм для расчета взаимодействия элементов контакта «щетка – коллектор» при работе двигателя

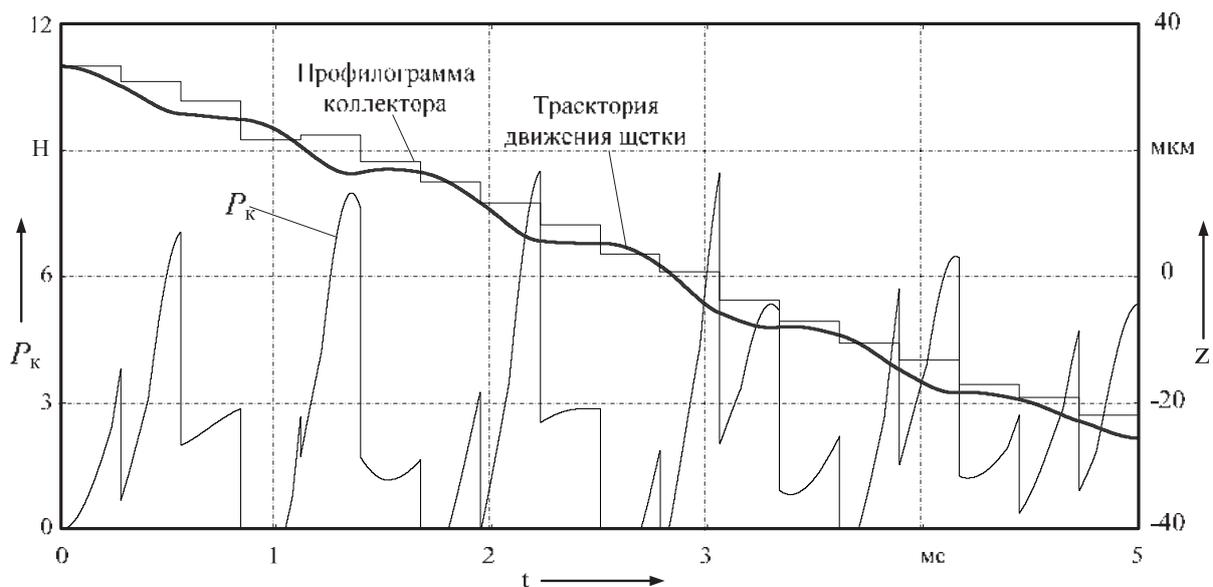


Рисунок 3 – Фрагмент графика движения щетки по коллектору и изменение упругой силы в зоне контакта «щетка – коллектор»

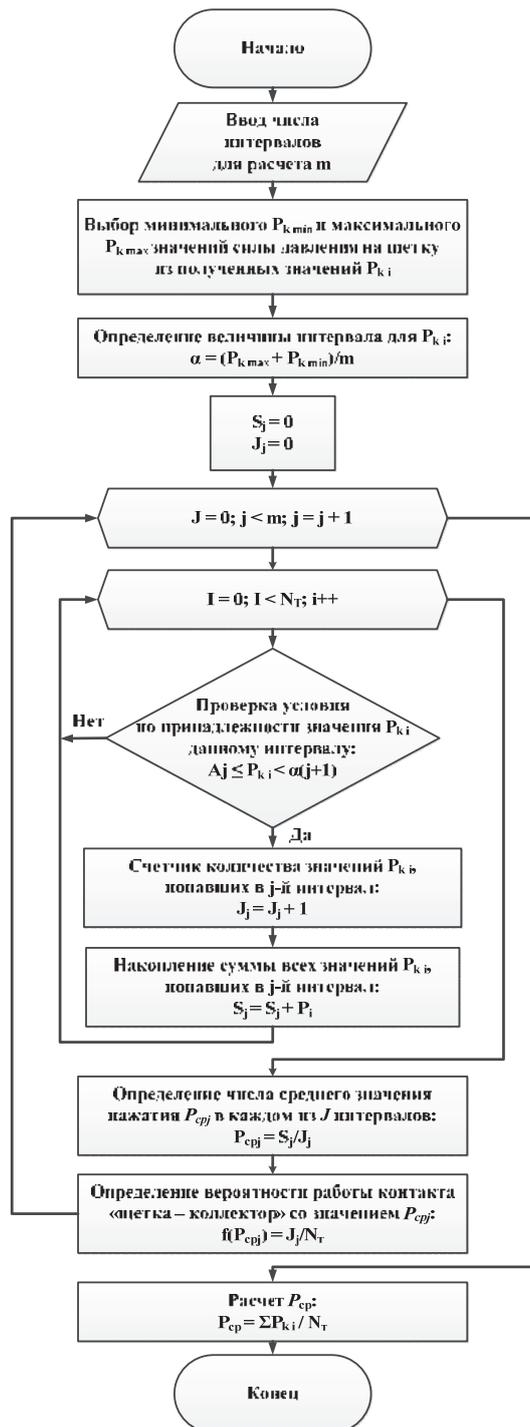


Рисунок 4 – Алгоритм для расчета распределения давления в точке контакта «щетка – коллектор» во время работы двигателя

На следующем шаге алгоритма (см. рисунок 1) производится определение фрикционной составляющей износа щетки  $\Delta I_{\phi}$  с учетом среднего значения давления.

Завершающий этап алгоритма состоит в расчете суммарного износа щетки  $\Delta I$  по формуле (1) и определении ресурса работы щетки  $T_{щр}$ . Для определения  $T_{щр}$  необходимо знать допустимое значение износа  $l_{щд}$  и текущую высоту щетки  $l_{щ}$ . Определение ресурса работы производится по формуле:

$$T_{\text{щр}} = \frac{l_{\text{щ}} - l_{\text{шд}}}{\Delta И / \Delta t} \quad (6)$$

Представленный в статье подход к прогнозированию остаточного ресурса щетки (см. рисунок 1) позволяет, учитывая параметры режима работы ТЭД, минимизировать количество измерений, необходимых для определения постоянных коэффициентов уравнения, требующихся для расчета.

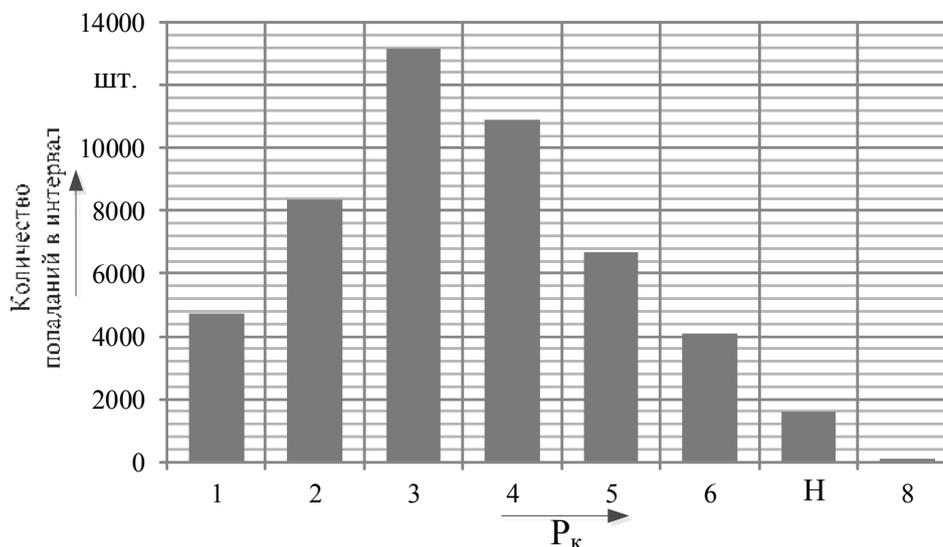


Рисунок 5 – Гистограмма распределения величины давления в контакте «щетка – коллектор»

Набор измерительного оборудования для реализации прогнозирования остаточного ресурса щетки должен включать в себя приборы для измерения следующих величин: геометрических размеров, массы щетки, энергии искрения в относительных единицах, профиля коллектора, тока якоря, частоты вращения ротора и силы нажатия пружины.

По результатам испытаний возможно формирование базы данных со значениями постоянных коэффициентов уравнения, что позволит упростить в дальнейшем процесс прогнозирования. Полученные в результате эксперимента коэффициенты имеют однозначные значения, что исключает субъективный подход к их определению и снижает погрешность результатов прогнозирования.

### Список литературы

1. Качин, О. С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2008. – 21 с.
2. Крагельский, И. В. Основы расчета на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник [Текст] / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 2001 – 664 с.
4. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.
5. Мышкин, Н. К. Электрические контакты [Текст] / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с.
6. Лившиц, П. С. Щетки электрических машин [Текст] / П. С. Лившиц. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 80 с.
7. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: Монография [Текст] / В. В. Харламов. – Омск, 2002. – 233 с.

8. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых двигателей электровозов: Монография / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – 198 с.

9. Харламов, В. В. Оценка влияния профиля коллектора машины постоянного тока на работу скользящего контакта / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков // Омский научный вестник. – 2016. – Вып. 4 (148). – С. 62 – 65.

10. Сайфуллин, Р. С. Композиционные покрытия и материалы [Текст] / Р. С. Сайфуллин. – М.: Химия, 1977 – 272 с.

## References

1. Kachin O. S. *Povyshenie resursa skolzyashego kontakta universalnikh kollektornikh elektrodvigateley* (Increase of the resource of sliding contact of universal collector electric motors). Ph.D. thesis, Tomsk, 2008, 178 p.

2. Kragelskiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy rascheta na trenie i iznos* (The basis of calculation for friction and wear). Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.

3. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. *Osnovi tribologii* (The basics of tribology). Moscow: Mashinostroenie, 2001, 664 p.

4. Holm R. *Elektricheskie kontakty* (Electric contacts). Moscow: Foreign, 1961, 464 p.

5. Myshkin N. K., Konchits V. V., Braunovic M. *Elektricheskie kontakty* (Electric contacts). Dolgoprudny: Intellect Publ., 2008, 560 c.

6. Livshic P. S. *Shetki elektricheskikh mashin* (Brushes of electric machines). Moscow: Energoatomizdat, 1989, 80 p.

7. Kharlamov V. V. *Metodi i sredstva diagnostirovaniya tehniceskogo sostoyaniya kollektornoschetchnogo uzla tyagovih elektrodvigatelei i drugih kollektornykh mashin postoyannogo toka: monografiya* (Methods and means for diagnosing the technical condition of the traction motors collector-brush assembly and other collector DC machines: monograph). Omsk: OSTU, 2002, 233 p.

8. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Dolgova A. V., Ahunov D. A. *Sovershenstvovanie tehnologii diagnostirovaniya tehniceskogo sostoyaniya kollektorno-shetchnogo uzla tyagovykh dvigatelei elektrovovozov: monografiya* (Improvement of technology for diagnosing the technical condition of the collector-brush assembly of traction engines of electric locomotives: monography). Omsk: OSTU, 2015, 198 p.

9. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. Evaluation of the influence of the DC collector profile on the operation of the sliding contact [Ocenka vliyaniya profilya kollektora mashiny postoyannogo toka na rabotu skolzyashego kontakta]. *Omskiy nauchniy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 4 (148), pp. 62 – 65.

10. Saifullin R. S. *Kompozitsionnye pokritiya i materialy* (Composite coatings and materials). Moscow: Chemistry, 1977, 272 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

E-mail: emoe@omgups.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of technical science, professor, the head of department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27

Email: emoe@omgups.ru

## **Попов Денис Игоревич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

## **Байсадыков Марсель Фаритович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Инженер кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: marsel\_b@mail.ru

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ**

Харламов, В. В. Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 47 – 56.

## **Popov Denis Igorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering»

Phone: +7 (3812) 31-18-27

Email: Popovomsk@yandex.ru

## **Baysadykov Marsel Faritovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Applicant of the department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27

Email: marsel\_b@mail.ru

## **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. The algorithm of forecasting of resource of electric brush-traction motors. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 47 – 56 (In Russian).

УДК 621.3.053.21

## **К. В. Авдеева, А. А. Медведева, А. В. Уткина**

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

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДРЕНАЖНАЯ УСТАНОВКА**

**Аннотация.** По результатам анализа существующих средств дренажной защиты выявлено, что ни одно из них не обеспечивает нахождение потенциала заземляющего устройства тяговой подстанции (ЗУ ТП) относительно медно-сульфатного электрода сравнения (МСЭ) в защитном диапазоне за весь период эксплуатации. Для устранения данного недостатка выполнено совершенствование автоматической дренажной установки. Основой работы автоматической дренажной установки является управление током дренажа путем изменения длительности импульса тока, регулируемой автоматически, относительно заданного значения потенциала «ЗУ ТП – МСЭ». В статье приведены функциональная схема с описанием основных узлов усовершенствованной автоматической дренажной установки и результаты испытаний макетного образца в полевых условиях. При проведении испытаний автоматическая дренажная установка доказала свою эффективность в полевых условиях. Представленные результаты испытаний наглядно иллюстрируют, что автоматическая дренажная установка ограничивает ток, протекающий через заземляющее устройство к минусу тяговой подстанции, не давая потенциалу «ЗУ ТП – МСЭ» отклоняться от установленного значения.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, тяговая подстанция, блуждающие токи, автоматическая дренажная установка, защитный потенциал.

**Ksenia V. Avdeeva, Anna A. Medvedeva, Anastasia V. Utkina**  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## AUTOMATIC DRAINAGE UNIT

**Abstract.** *The existing protection does not provide protective potential of traction substation grounding grid for the entire period of operation. This disadvantage is removed by improving of automatic drainage unit. The basis of the automatic drainage system is automatic control of drainage current by changing the pulse width of current. This method of current control allows the defined potential remain at the set value. The article presents a functional diagram describing the basic units of the improved automatic drainage unit.*

*The results of the automatic drainage unit tests illustrate that the automatic drainage unit limits the current flowing through the grounding grid to the traction substation, allowing the potential remain at the set value*

*Improved automatic drainage unit has great advantages in relation to existing and operated drain units at this moment and it can be recommended for introduction to the electrification infrastructure of the railway industry. Also this automatic drainage unit can be used for protection of other metal underground structures such as pipelines and other metal structures influenced by stray currents.*

**Keywords:** *grounding grid, traction substation, stray current, automatic drainage unit, protective potential.*

Заземляющее устройство тяговой подстанции находится в непосредственной близости от точки подключения отсасывающей линии к тяговым рельсам и располагается в зоне высоких градиентов потенциала, создаваемых обратным тяговым током. Этим обуславливается протекание через элементы заземляющего устройства токов, достигающих значительных величин, превышающих 100 А [1].

Защита дренажными установками заключается в отводе тока с заземляющего устройства на источник.

Существующие установки дренажной защиты можно разделить на три группы: поляризованные, автоматические и усиленные.

Поляризованная дренажная установка [1] обладает односторонней проводимостью, которая обеспечивается последовательным включением поляризованного реле или вентильных элементов в дренажную цепь. Суточные и сезонные изменения интенсивности движения поездов влияют на значения тяговых токов и, как следствие, приводят к значительным колебаниям разности потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ». При этом в отдельные моменты времени на защищаемом сооружении потенциал может выходить за пределы защитных значений, установленных нормативной документацией [2]. Тем самым однократный выбор значения добавочного сопротивления не обеспечивает защиту ЗУ ТП от коррозии блуждающими токами в условиях эксплуатации.

Усиленная дренажная установка [1] отличается от поляризованного дренажа наличием источника выпрямленного напряжения, позволяющего увеличить дренажный ток. Это позволяет поддерживать защитный потенциал на подземном сооружении при его недозащите. Недостатками данной установки являются необходимость в дополнительном источнике питания и перезащите сооружения.

Существуют поляризованные дренажные установки, которые в зависимости от значения силы тока дренажа осуществляют коммутацию наборов сопротивлений и элементов, имеющих одностороннюю проводимость [3]. Данная установка не обеспечивает плавной регулировки тока дренажа, что также может привести к выходу потенциала за пределы защитного диапазона.

Таким образом, существующие установки дренажной защиты не обеспечивают нахождение потенциала «ЗУ ТП – МСЭ» в защитном диапазоне за весь период эксплуатации. Поэтому было проведено совершенствование автоматической дренажной установки, устраняющее данный недостаток.

Управление постоянным током в десятки и сотни ампер является непростой задачей, требующей грамотного подхода в выборе средств реализации. Для ее решения целесообразно использовать мощные электронные коммутаторы на токи в сотни ампер, в качестве которых

может выступать, например, тиристор с принудительным закрыванием [4] или биполярный транзистор с изолированным затвором.

Значение потенциала «ЗУ ТП – МСЭ» можно поддерживать на заданном уровне путем представления тока дренажа импульсной последовательностью с постоянным периодом коммутации, но изменяющейся длительностью импульсов тока.

Работу автоматической дренажной установки можно описать так [3]:

$$U_{\text{ЗУ ТП-МСЭ}} = KI_{\text{д}} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ЗУ ТП-МСЭ}}$  – разность потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ», В;

$I_{\text{д}}$  – ток в дренажной цепи, А;

$K$  – коэффициент пропорциональности,

$$I_{\text{д}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} I(t) dt, \quad (2)$$

где  $T$  – период импульсов тока в дренажной цепи, с;

$t_1$  – длительность импульса, с;

$I(t)$  – текущее значение тока, А.

Так как интегрирование производится в малые промежутки времени ( $0 - t_1$ ), то без большой погрешности можно допустить, что ток остается величиной постоянной и его можно вынести за знак интеграла [4]:

$$I_{\text{д}} = \frac{I}{T} \int_0^{t_1} dt = \frac{I}{T} t_1 = \frac{I}{Q}, \quad (3)$$

где  $Q = \frac{T}{t_1}$  – скважность.

$I(t) = I, 0 < t \leq t_1;$

$I(t) = 0, t_1 < t \leq T.$

Следовательно, можно записать [4]:

$$U_{\text{ЗУ ТП-МСЭ}} = \frac{KI}{Q} = KI_{\text{д}}. \quad (4)$$

Таким образом, можно добиться эффективного управления током дренажа путем изменения длительности импульса тока, регулируемой автоматически, относительно заданного значения потенциала «ЗУ ТП – МСЭ». Такой подход исключает увеличение разности потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ» и возможную перезащиту элементов заземляющего устройства тяговой подстанции, которая может привести к развитию электрокоррозии.

Данный принцип является основой работы усовершенствованной дренажной установки.

Структурная схема усовершенствованной автоматической дренажной установки представлена на рисунке 1.

Автоматическая дренажная установка (АДУ) включает в себя два основных блока: дренажную цепь 1 и блок управления 8. Дренажная цепь представлена последовательным соединением предохранителя 2, рубильника 3, шунта 4, к которому подключается измерительный прибор 5 силового коммутатора 6.

Блок управления 8 включает в себя фильтр низких частот 9, ко входам которого подключаются заземляющее устройство тяговой подстанции и медно-сульфатный электрод сравнения 7, сравнивающее устройство 10, источник опорного напряжения 11, генератор тактовых импульсов 12, формирователь пилообразного напряжения 13, усилитель сигнала ошибки 14, компаратор 15, счетный триггер 16, схемы совпадения 17 и 18, схема «ИЛИ» 19.

Данная АДУ [5] является усовершенствованием схемы, приведенной в работе [4]. Усовершенствование заключается в добавлении фильтра низких частот 9. Поскольку при работе

АДУ потенциал «ЗУ ТП – МСЭ» представляет собой импульсный сигнал, а в нормативной документации [2] указаны постоянные значения потенциала, то с помощью фильтра низких частот 9, на вход которого поступает разность потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ», выделяется постоянная составляющая потенциала «ЗУ ТП – МСЭ». На один из входов сравнивающего устройства 10 выделяется постоянная составляющая сигнала «ЗУ ТП – МСЭ», на другой вход – сигнал от источника опорного напряжения 11. Сравнивающее устройство 10 формирует сигнал ошибки, который после усилителя сигнала ошибки 14 поступает на один из входов компаратора 15. На другой вход компаратора 15 приходит пилообразное напряжение (рисунок 2, б) от формирователя пилообразного напряжения 13, которое синхронизируется сигналом  $U_T$  (рисунок 2, а) от генератора тактовых импульсов 11. Импульсу длительностью  $t_1$  соответствует сигнал ошибки  $U_{01}$ , импульсу длительностью  $t_2$  –  $U_{02}$ .

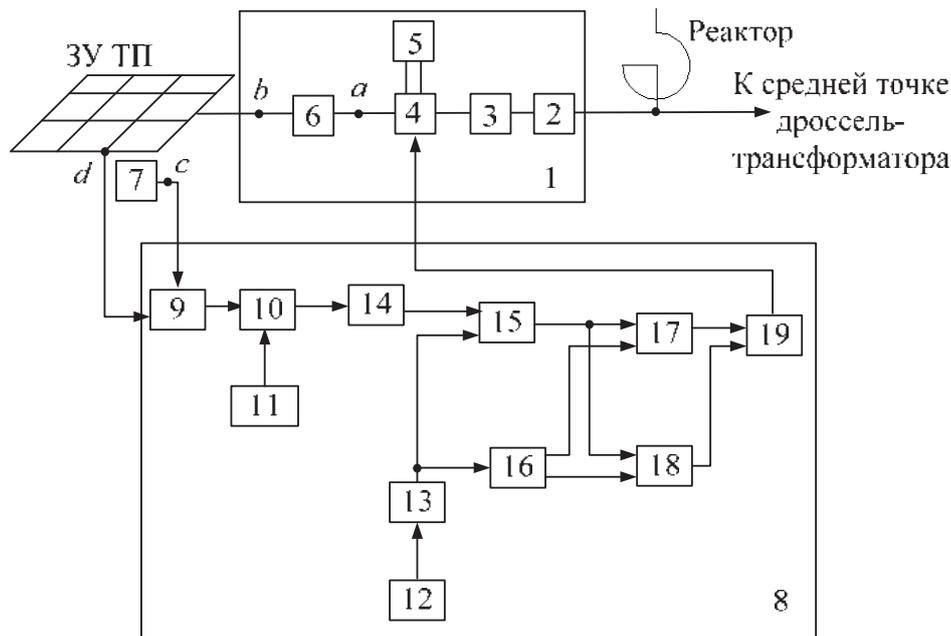


Рисунок 1 – Структурная схема автоматической дренажной установки

Пилообразное напряжение (см. рисунок 2, б) также подается на триггер 16, с неинвертирующего выхода которого импульсы прямоугольной формы  $U_{i1}$  длительностью  $T$  и периодом следования  $2T$  (рисунок 2, в) приходят на вход схемы совпадения 17. На вход схемы совпадения 18 поступают прямоугольные импульсы  $U_{i2}$  с инвертирующего выхода счетного триггера 16, имеющие сдвиг на полпериода  $T$  по сравнению с  $U_{i1}$  (рисунок 2, г). На другие входы схем совпадения 17 и 18 идут импульсы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с выхода компаратора 15 с переменной длительностью, которая уменьшается при увеличении сигнала ошибки.

С выходов схем совпадения 17 и 18 импульсы поступают на схему «ИЛИ» 19. На выходе схемы «ИЛИ» 19 из входных сигналов складывается импульсная последовательность  $U_v$  с меняющейся скважностью, длительность импульсов которой тем меньше, чем больше потенциал «ЗУ ТП – МСЭ» (рисунок 2, д).

Импульсная последовательность  $U_v$  управляет силовым коммутатором 6, входящим в состав дренажной цепи 1. За время импульса через коммутатор происходит отвод блуждающих токов с ЗУ ТП в отсасывающую линию тяговой подстанции. Во время паузы коммутатор размыкает цепь.

Для определения величины дренажного тока предусмотрен шунт 4 с измерительным прибором 5.

Для защиты автоматической дренажной установки от токов, превышающих максимально допустимые значения, служит предохранитель 2 [5].

На одной из тяговых подстанций постоянного тока были проведены испытания макетного образца усовершенствованной автоматической дренажной установки. Усовершенствованная АДУ на время испытаний подключалась вместо существующей поляризованной дренажной установки (ПДУ). Схема включения представлена на рисунке 3. Перед началом испытаний были проведены измерения потенциала заземляющего устройства относительно медно-сульфатного электрода сравнения. Потенциал «ЗУ ТП – МСЭ» в отсутствие тока в дренажной цепи составил минус 0,6 В, что соответствует недостаточной защищенности ЗУ ТП.

На передней панели макетного образца имеется ручка установки требуемого значения потенциала «ЗУ ТП – МСЭ».

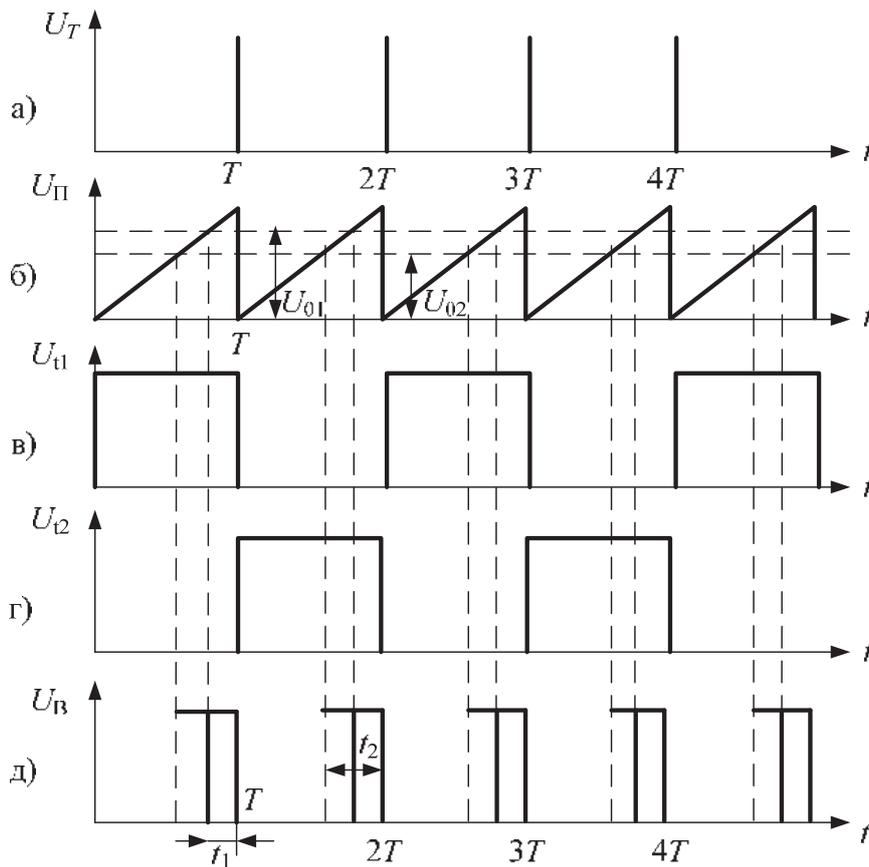


Рисунок 2 – Временные диаграммы работы автоматической дренажной установки

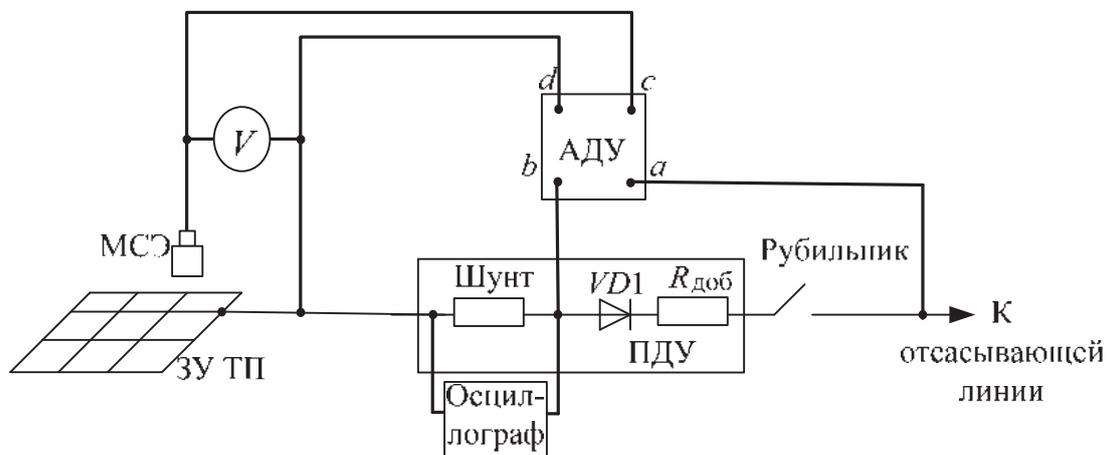


Рисунок 3 – Схема для проведения испытаний

На рисунках 4 и 5 приведены осциллограммы тока в дренажной цепи при работе автоматической дренажной установки при значениях потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ», равных минус 1 В и минус 1,3 В соответственно.

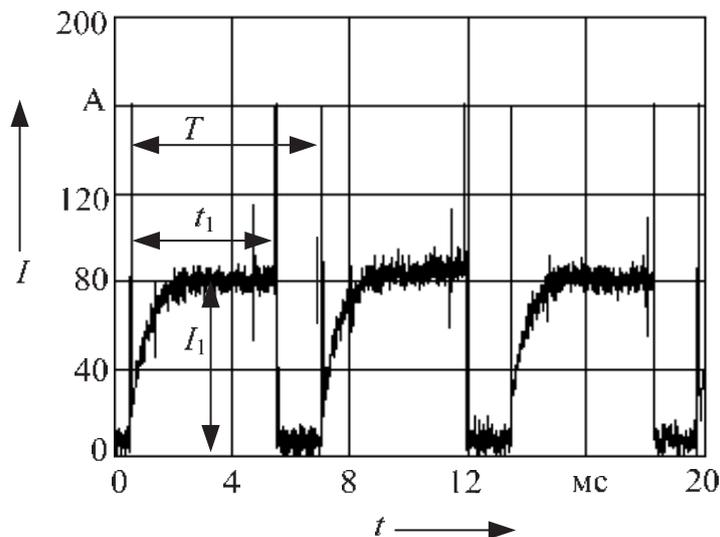


Рисунок 4 – Осциллограмма тока в дренажной цепи при значении потенциала «ЗУ ТП – МСЭ», равном минус 1 В

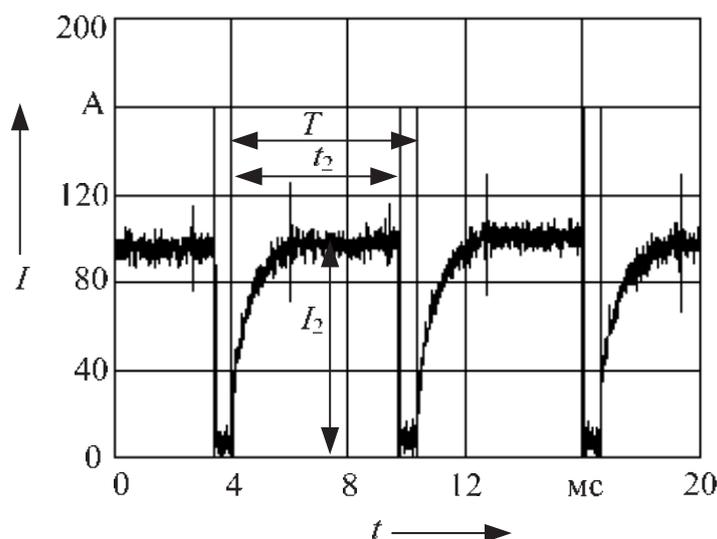


Рисунок 5 – Осциллограмма тока в дренажной цепи при значении потенциала «ЗУ ТП – МСЭ», равном минус 1,3 В

На осциллограммах (см. рисунки 4, 5) период коммутации автоматической дренажной установки  $T$  равен 6,38 мс. На первой осциллограмме (см. рисунок 4) длительность импульса  $t_1 = 4,94$  мс, амплитуда импульса тока  $I_1 = 83$  А.

На второй осциллограмме (см. рисунок 5) длительность импульса  $t_2 = 5,66$  мс, амплитуда импульса тока  $I_2 = 95$  А.

Подставив значения  $T$ ,  $t_1$ ,  $I_1$ ,  $t_2$ ,  $I_2$  в формулу (3), определим ток дренажа для обоих случаев. При значении разности потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ», равном минус 1 В,  $I_d = 64$  А, при значении разности потенциалов «ЗУ ТП – МСЭ», равном минус 1,3 В, значение  $I_d$  больше и равно 84 А.

Из выражения (4) коэффициент пропорциональности  $K$  составил  $-0,0155$ .

При сравнении осциллограмм на рисунках 4 и 5 и результатов расчетов видно, что в обоих случаях автоматическая дренажная установка ограничивает ток, протекающий через

заземляющее устройство к минусу тяговой подстанции, не давая потенциалу «ЗУ ТП – МСЭ» отклоняться от установленного значения более чем на  $\pm 0,1$  В.

При проведении эксперимента постоянно замерялся потенциал «заземляющее устройство тяговой подстанции – медно-сульфатный электрод сравнения» при помощи вольтметра. При этом заданные на автоматической дренажной установке значения потенциала соответствовали его показаниям. Следовательно, добавление фильтра низких частот позволяет повысить точность поддержания потенциала «заземляющее устройство тяговой подстанции – медно-сульфатный электрод сравнения».

Сравнительные вольт-амперные характеристики усовершенствованной автоматической установки и поляризованной дренажной установки приведены на рисунке 6.

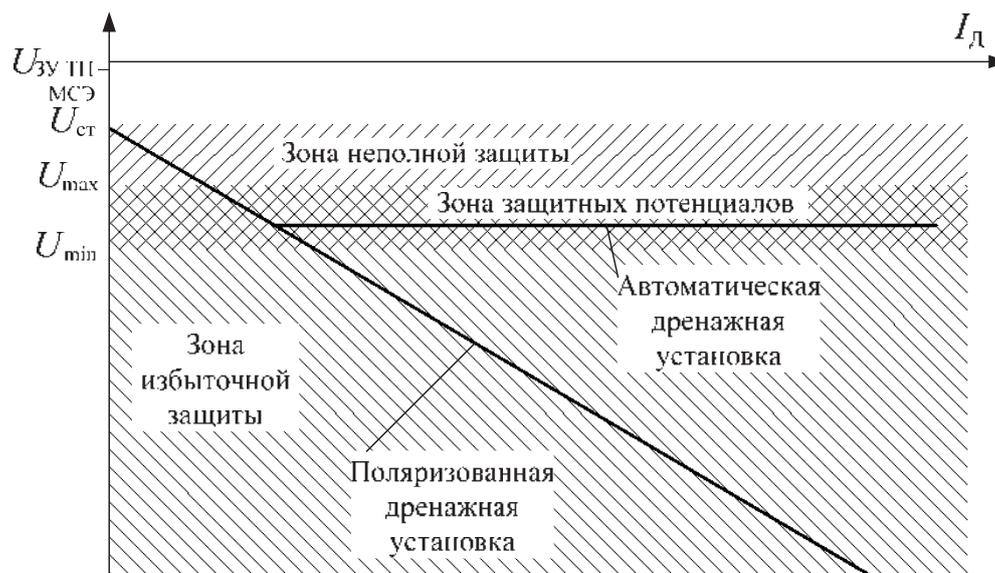


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика поляризованной и автоматической дренажных установок

Усовершенствованная автоматическая дренажная установка позволяет при изменении тока в дренажной цепи удерживать значение потенциала «ЗУ ТП – МСЭ» в зоне защитных потенциалов.

Полевые испытания подтвердили эффективность предложенных схемных решений усовершенствованной АДУ.

АДУ имеет значительные преимущества по сравнению с существующими дренажными установками, такие как повышение точности поддержания потенциала «ЗУ ТП – МСЭ», автоматическое управление током дренажа, малое энергопотребление и стоимость самой дренажной установки, и может быть рекомендована для защиты как ЗУ тяговых подстанций постоянного тока электрифицированных железных дорог, так и других подземных сооружений, таких как трубопроводы и прочие металлические конструкции, подверженные воздействию блуждающих токов.

### Список литературы

1. Котельников, А. В. Совершенствование защиты железнодорожных конструкций от электрокоррозии [Текст] / А. В. Котельников, Е. А. Баранов. – М.: Транспорт. – 1990. – 32 с.
2. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные [Текст] / Общие требования к защите от коррозии. Актуализированная редакция. Введ. с 01.01.2007. – М.: Стандартинформ. – 2013. – 60 с.
3. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами [Текст] / И. В. Стрижевский. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 238 с.

4. 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.

## References

1. Kotelnikov V. A., Baranov E. A. *Sovershenstvovanie zashhity zheleznodorozhnykh konstrukcij ot jelektrokorrrozii* (Improve the protection of railway structures from electrocorrosion). М.: Transport, 1990, 32 p.

2. *Edinaya Sistema zachity ot korrozii i stareniya. Sooryjeniya podzemnye. Obchie trebovaniya k zachite ot korrozii. Aktualizirovannaya redakcia*, GOST 9.602-2005 (Unified system of protection from corrosion and ageing. The construction of underground. General requirements for corrosion protection. Revised edition, State Standard, Russian National Standard). Moskov, 2013, 60 p.

3. Strizhevskiy I. V. *Teoriya i raschet drenazhnoj i katodnoj zashhity magistral'nyh truboprovodov ot korrozii bluzhdajushhimi tokami* (Theory and calculation of drainage and cathodic protection of pipelines from corrosion stray currents). М.: Gostoptekhizdat, 1963, 238 p.

4. Kotelnikov V. A., Kandev V. A. *Blyzdauchie toki I eksplyatacionnyy kontrol korroziionnogo sostoiana podzemnich sooryjeniy sistemy elektrosnabgenia jeleznodorojnogo transporta* (Stray currents and operational control of corrosion condition of underground structures of supply system of railway transport). М., 2013, 552 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### 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) 37-60-82.

### Медведева Анна Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

E-mail: maa1024@yandex.ru

### Уткина Анастасия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Авдеева, К. В. Автоматическая дренажная установка [Текст] / К. В. Авдеева, А. А. Медведева, А. В. Уткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 56 – 63.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Telecommunications, radiotechnical systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

### Medvedeva Anna Aleksandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Telecommunications, radiotechnical systems and networks», OSTU.

E-mail: maa1024@yandex.ru.

### Utkina Anastasia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Telecommunications, radiotechnical systems and networks», OSTU.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Avdeeva K. V., Medvedeva A. A., Utkina A. V. Automatic drainage unit. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 56 – 63 (In Russian).

УДК 621.331:621.311

**С. Г. Истомир**

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

## **АПРОБАЦИЯ МЕТОДА СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА И НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГРАНИЦАХ ЗОН УЧЕТА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

***Аннотация.** В статье рассмотрено текущее положение в части организации контроля над использованием тягово-энергетических ресурсов ОАО «РЖД». Изложены основные положения предлагаемого метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии. Проведена оценка влияющих факторов на удельный расход электроэнергии электровозов серий 2ЭС6 и ВЛ10, а также оценка качества построенных моделей множественной нелинейной регрессии. Предложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, позволяющие обеспечить снижение удельного расхода и непроизводительных потерь электрической энергии в границах зон учета железной дороги.*

***Ключевые слова:** электроподвижной состав, удельный расход электроэнергии, непроизводительные потери электроэнергии, корреляционный анализ, неграфиковые остановки, ограничение скорости движения.*

**Stanislav G. Istomin**

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

## **APPROBATION OF THE METHOD OF REDUCING THE SPECIFIC EXPENDITURE AND NON-PRODUCTIVE LOSS OF ELECTRICITY IN THE BOUNDARIES OF RAILWAY ACCOUNT ZONES**

***Abstract.** The article considers the current situation regarding the organization of control over the use of traction and energy resources of JSC «Russian Railways». The main provisions of the proposed method are stated. The influence factors on the specific electric power consumption of electric locomotives of series 2ES6 and VL10, as well as the evaluation of the quality of the constructed models of multiple nonlinear regression were estimated. New scientifically grounded technological solutions and developments are proposed that allow to reduce the specific consumption and unproductive losses of electric energy within the boundaries of the railway accounting areas.*

***Keywords:** electric rolling stock, specific electricity consumption, unproductive electricity losses, correlation analysis, non-graphical stops, speed limit.*

Компания ОАО «Российские железные дороги» является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов, на долю которого приходится около 4,4 % от всей вырабатываемой в России электроэнергии, 85 % которой расходуется на тягу поездов, поэтому приоритетными задачами энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. являются качественное улучшение структуры управления потреблением тягово-энергетических ресурсов (ТЭР) на основе использования современных информационных технологий, систем учета, нормирования и мониторинга потребления ТЭР и значительное повышение показателей энергетической эффективности тяги поездов [1]. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода ТЭР на тягу поездов к уровню 2015 г. должно составить к 2020 г. от 2,5 до 4,4 %, к 2030 г. – от 8,0 до 9,0 %, что может быть достигнуто, в частности, за счет выявления участков железных дорог с неэффективным использованием электрической энергии; выявления локомотивов с систематическим перерасходом электрической энергии с целью постановки их на неплановый вид ремонта; снижения доли непроизводительных потерь электроэнергии и отнесения их на виновных участников перевозочного процесса; снижения технологических и коммерческих потерь электроэнергии в тяговой сети; повышения эффективности нормирования удельного расхода электроэнергии (УРЭ) ТЭР; внедрения коммерческого учета электроэнергии в связи с появлением частного электроподвижного состава (ЭПС).

В настоящее время ряд факторов препятствует реализации на должном уровне названных выше мероприятий.

Существующие системы учета имеют следующие недостатки: низкий класс точности, высокий порог чувствительности, отсутствие системы спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС, отсутствие беспроводной передачи данных, уязвимость для несанкционированного вмешательства в их работу извне.

Автоматизированная система централизованной обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) имеет следующие недостатки: источником данных ЦОММ являются маршруты машинистов, где указываются только общий расход и возврат электроэнергии по результатам работы локомотивных бригад, что ограничивает проведение более детального анализа энергопотребления ЭПС и поиска резервов сбережения ТЭР; не позволяет получать информацию об эффективности использования электроэнергии ЭПС по итогам суток, что препятствует оперативной разработке мероприятий по снижению потерь электроэнергии; предполагает ручной ввод информации с маршрута машиниста, что приводит к появлению многочисленных ошибок в статистической отчетности и, как следствие, к недостоверной организации учета электроэнергии, возникновению доли коммерческой составляющей потерь электроэнергии в тяговой сети и неадекватному нормированию ТЭР.

Анализ отчетных данных системы ЦОММ за 2014 и 2015 гг. об энергопотреблении электровозов, эксплуатирующихся на различных участках Западно-Сибирской железной дороги, показал, что имеется значительный потенциал снижения непроизводительных потерь электроэнергии и существуют проблемы в организации достоверного учета электроэнергии. Непроизводительные потери электрической энергии за 2014 г. составили 2,1 % и за 2015 г. – 3,8 % от общего потребления электроэнергии на тягу поездов. В абсолютном выражении это составляет около 26,8 млн кВт·ч в 2014 г. и 53,6 млн кВт·ч за 2015 г. Недочет электрической энергии за 2014 г. составляет 2,6 % и за 2015 г. – 4,1 % от общего потребления электроэнергии на тягу поездов. В абсолютном выражении это составляет около 33,2 млн кВт·ч в 2014 г. и 57,5 млн кВт·ч за 2015 г.

Перечисленные недостатки в той или иной мере могут быть устранены с внедрением на сети железных дорог разработанных в ОмГУПСе при участии автора информационно-измерительных комплексов электроподвижного состава (ИИК ЭПС), выполняющих измерение приращения энергии за интервалы времени от долей секунды до нескольких секунд со спутниковым позиционированием местоположения ЭПС, и системы обработки данных с них.

Достигнуть такого результата позволит организация автоматизации процессов сбора и передачи данных об энергопотреблении с ИИК ЭПС по беспроводным каналам связи и их дальнейшей обработки на верхнем уровне автоматизированной системы без участия человека.

Для того чтобы заниматься дальнейшими исследованиями в области повышения энергетической эффективности ЭПС, в распоряжении ОАО «РЖД» от 16.10.2010 № 2339р было введено понятие зоны учета.

Под зоной учета понимается неразветвленный электрифицированный участок железной дороги, в пределах которого действует единый тариф на электрическую энергию, при выборе границ которого должно учитываться расположение участков работы локомотивных бригад.

Схема разделения железных дорог на зоны учета представлена на рисунке 1.

В данной работе приведены результаты апробации разработанного метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги, позволяющего по итогам суток локализовывать зоны учета с повышенным значением удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии с детализацией по четному и нечетному направлениям, по принадлежности к локомотивному депо, сериям и номерам локомотивов и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС [2 – 6].

Снижение удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги по итогам суток предлагается осуществлять в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2.

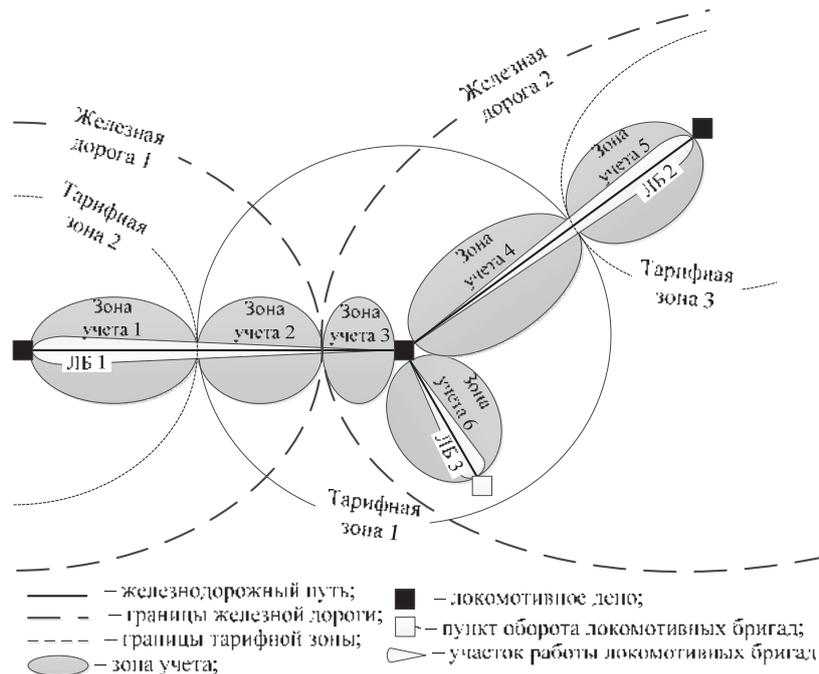


Рисунок 1 – Схема разделения железных дорог на зоны учета

Ниже приведены результаты апробации метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги на примере эксплуатационного депо ТЧЭ-2 Омск.

В соответствии с предложенным алгоритмом (см. рисунок 2) вначале необходимо определить нормы удельного расхода электроэнергии ЭПС в зонах учета железной дороги на основе базы данных «нормальных» поездов (поездки, исполненные в рамках нормативного графика движения и уложившиеся в установленный диапазон отклонения от нормы УРЭ в  $\pm 30\%$ ).

Определение норм расхода выполняется в два этапа.

На первом этапе, т. е. при введении в эксплуатацию ИИК ЭПС и системы обработки данных с них, а также при отсут-



Рисунок 2 – Алгоритм снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги

ствии на определенных участках железных дорог устойчивых статистических закономерностей формирования и изменения УРЭ в зависимости от выбранных факторов используется численный метод расчета расхода электроэнергии на движение поезда. По результатам расчета расхода и возврата электроэнергии данным методом формируются энергетические диаграммы.

На втором этапе используется статистический метод, в частности, метод корреляционно-регрессионного анализа.

При реализации автоматизированного учета электроэнергии на ЭПС с помощью ИИКа в качестве основного метода прогнозирования расхода электроэнергии на тягу необходимо использовать статистический метод, поэтому ниже приводятся результаты определения норм расхода электроэнергии именно данным методом.

Для адекватного определения норм УРЭ статистическим методом были отобраны данные об энергопотреблении магистральных грузовых электровозов серии 2ЭС6 «Синара» и ВЛ10, полученные по результатам расшифровки картриджей регистраторов параметров движения. В этом случае ошибки при определении фактического расхода и возврата электроэнергии были сведены к минимуму.

В результате для определения норм расхода электроэнергии получили уравнения множественной регрессии и исследовали значимость коэффициентов этих уравнений для различных сочетаний факторов. Для исследования были выбраны следующие факторы: масса состава, нагрузка на ось, температура атмосферного воздуха, количество остановок, количество временных ограничений скорости движения, участковая и техническая скорость.

Основные расчеты производились в программе Statistica на основе данных из выборки поездок с электровозами 2ЭС6 и ВЛ10 в четном и нечетном направлениях за 2015 г. В качестве примера в таблице 1 приведены итоговые результаты анализа влияния факторов на УРЭ электровозов 2ЭС6 (участок Барабинск – Московка), полученные в программе Statistica.

Рассмотрим механизм оценки влияния факторов на примере таблицы 1. В зависимую переменную «удельный расход» больший вклад вносит в четном и в нечетном направлениях нагрузка на ось ( $p = 0,000684$ ), а меньший – техническая скорость ( $p = 0,91$ ). Отрицательный знак коэффициентов при переменных означает, что с увеличением, к примеру, в четном направлении массы состава, нагрузки на ось и температуры величина удельного расхода снижается. Положительный знак коэффициента при переменной «количество ограничений скорости означает, что с увеличением количества ограничений скорости уровень удельного расхода» растет. Коэффициенты уравнения регрессии  $B_1, B_2, B_3$  и свободный член для четного и нечетного направлений статистически значимы при уровне значимости  $p = 0,1$ ; коэффициенты уравнения регрессии  $B_4, B_5, B_6$  статистически незначимы, так как  $p > 0,1$ .

Таблица 1 – Результаты оценки влияния факторов на удельный расход электровозов 2ЭС6 «Синара» в программе Statistica

Факторы	Коэффициент регрессии B	Стандартная ошибка	t-статистика	Вероятность отклонения гипотезы о значимости частных коэффициентов корреляции p	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
1	2	3	4	5	6	7
Четное направление						
Свободный член	170,9	33,3	5,13	<b>0,000112</b>	104,9	236,9
Масса состава, т	-0,009	0,0026	-3,49	<b>0,000684</b>	-0,014	-0,004
Нагрузка на ось, т	-3,045	0,76	-3,99	<b>0,000114</b>	-4,55	-1,53
Температура, °С	-0,26	0,13	-1,99	<b>0,048282</b>	-0,52	-0,002
Количество остановок	-2,63	3,56	-0,74	0,46	-9,69	4,43

Окончаник таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Количество ограничений скорости	2,32	2,04	1,14	0,26	-1,72	6,37
Участковая скорость, км/ч	-0,068	0,33	-0,21	0,83	-0,72	0,58
Техническая скорость, км/ч	-0,066	0,54	-0,12	0,91	-1,14	1,002
Нечетное направление						
Свободный член	140,1	12,3	11,4	<b>3,82·10<sup>24</sup></b>	115,9	164,3
Масса состава, т	-0,003	0,0014	-2,02	<b>0,044</b>	-0,006	-6,9·10 <sup>5</sup>
Нагрузка на ось, т	-3,33	0,45	-7,38	<b>2,9·10<sup>12</sup></b>	-4,22	-2,44
Температура, °С	-0,41	0,064	-6,41	<b>8,4·10<sup>10</sup></b>	-0,53	-0,28
Количество остановок	0,73	1,53	0,48	0,63	-2,28	3,75
Количество ограничений скорости	0,66	0,74	0,91	0,37	-0,79	2,11
Участковая скорость, км/ч	-0,09	0,16	-0,57	0,57	-0,41	0,28
Техническая скорость, км/ч	0,028	0,22	0,13	0,89	-0,39	0,45

В результате проведения описанного анализа было установлено, что статистически значимыми факторами, оказывающими влияние на УРЭ электровозов серий 2ЭС6 и ВЛ10, являются масса состава, нагрузка на ось и температура окружающего воздуха, которые включены в модель множественной нелинейной регрессии (таблица 2).

Таблица 2 – Уравнения множественной нелинейной регрессии для серии 2ЭС6 на плечах обслуживания локомотивных бригад депо ТЧЭ-2 Омск

Наименование плеча обслуживания	Направление	Уравнение регрессии
Входная – Иргышское	Неч.	$a_{э} = 24,6 + \frac{35966}{m_c} + \frac{440,8}{q} - 0,13 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 25,9 + \frac{22976}{m_c} + \frac{686,5}{q} - 0,64 \cdot t$
Входная – Ишим	Неч.	$a_{э} = 34,6 + \frac{46705}{m_c} + \frac{115,7}{q} - 0,12 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 25,1 + \frac{42078}{m_c} + \frac{558,1}{q} - 0,39 \cdot t$
Московка – Барабинск	Неч.	$a_{э} = 21,7 + \frac{22961}{m_c} + \frac{544,7}{q} - 0,33 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 21,2 + \frac{31632}{m_c} + \frac{559,5}{q} - 0,24 \cdot t$
Московка – Ишим	Неч.	$a_{э} = 24,3 + \frac{35308}{m_c} + \frac{450,4}{q} - 0,12 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 23,2 + \frac{45450}{m_c} + \frac{514,2}{q} - 0,39 \cdot t$

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

Проверка нормальности остатков выполнена с помощью критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ :

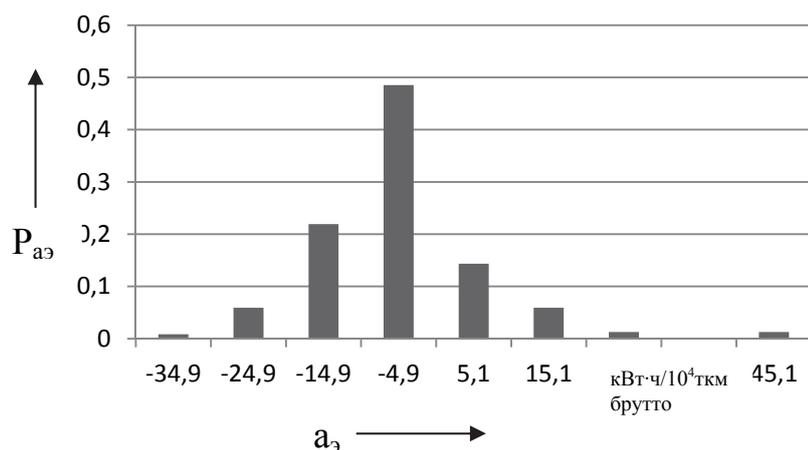


Рисунок 3 – Распределение остатков уравнения регрессии по нормальному закону

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

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

$n'_i$  – теоретические частоты.

В рассмотренных случаях при уровне значимости 0,05 не было оснований отвергнуть гипотезу о нормальности. Наблюдаемые значения получились ниже критических (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты проверки гипотезы о нормальном законе распределения с помощью критерия  $\chi^2$

Плечо обслуживания	Направление	Наблюдаемые значения $\chi^2$	Критические значения $\chi^2$
Входная – Иртышское	Нечет.	13,24	19,67
	Чет.	9,5	19,67
Входная – Ишим	Нечет.	14,54	18,3
	Чет.	12,62	19,67
Московка – Барабинск	Нечет.	8,74	21,03
	Чет.	7,56	18,31
Московка – Ишим	Нечет.	11,71	16,91
	Чет.	8,34	15,51

Проведена оценка качества построенной модели множественной регрессии, учитывающей перечисленные выше факторы.

Для оценки качества предсказания используется коэффициент детерминации  $R^2$ :

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

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

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

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

Следует отметить, что с целью анализа различных уравнений регрессии определение регрессионных коэффициентов выполнялось двумя способами:

1) по всем значениям выборки из генеральной совокупности (получены уравнения множественной нелинейной и линейной регрессии);

2) по средним значениям УРЭ в квантах с учетом статистического «веса» по относительной величине выполненной работы поездами в кванте по нагрузке на ось (получено уравнение гиперболической регрессии).

Окончательное определение и сравнение коэффициентов детерминации  $R^2$  для различных математических моделей производилось по первому способу, так как данный способ отличается своей простотой (соответствующие пакеты анализа имеются в программах Microsoft Excel 2007 и STATISTICA for Windows Release 8.0) и прозрачностью.

Результаты исследования, приведенные в таблице 4, подтвердили, что модель множественной нелинейной регрессии, учитывающая указанные факторы, в сравнении с моделями гиперболической нелинейной и множественной линейной регрессии позволит достичь в значительной мере более достоверного определения нормы УРЭ на поездку (получены более высокие значения  $R^2$ ). Важно также отметить, что данные параметры (нагрузка на ось, масса состава и температура) являются известными перед поездкой.

В конечном итоге по полученным уравнениям регрессии были определены соответствующие нормы УРЭ и проведен анализ их выполнения.

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

Плечо обслуживания	Направление	Варианты уравнений регрессии		
		$a_{\text{Э}} = B_0 + \frac{B_1}{q}$ (ЦОММ)	$a_{\text{Э}} = B_0 + \frac{B_1}{m_c} + \frac{B_2}{q} - B_3 \cdot t$	$a_{\text{Э}} = B_0 - B_1 \cdot m_c - B_2 \cdot \eta_0 - B_3 \cdot t$
Входная – Иргышское	Нечет.	0,165	0,627	0,234
	Чет.	0,521	0,735	0,556
Входная – Ишим	Нечет.	-0,02	0,699	0,328
	Чет.	0,68	0,781	0,693
Московка – Барабинск	Нечет.	0,507	0,699	0,583
	Чет.	0,403	0,832	0,449
Московка – Ишим	Нечет.	0,381	0,792	0,537
	Чет.	0,144	0,849	0,244

Анализ по плечам обслуживания локомотивных бригад (рисунок 4) показал, что нормы УРЭ не выполнены только на плече обслуживания Московка – Барабинск в нечетном направлении. Дальнейший анализ по сериям электровозов (рисунок 5), эксплуатирующихся на данном участке, показал, что нормы не выполнены электровозами серии 2ЭС6, затем выявлены поездки с электровозами 2ЭС6 (рисунок 6), в которых нормы вышли за установленный диапазон отклонения в  $\pm 30\%$ , и выявлены межподстанционные зоны (МПЗ) с пониженной энергетической эффективностью в конкретной поездке (рисунок 7), а также причина невыполнения локомотивной бригадой нормы УРЭ за поездку (выявлено наличие двух неграфиковых остановок и одного предупреждения об ограничении скорости).

Общая величина непроизводительных потерь электроэнергии от наличия двух неграфиковых остановок и одного предупреждения об ограничении скорости на участке в анализируемой

поездке (см. рисунок 7) составила 1287 кВт·ч. Если данное значение непроизводительных потерь электроэнергии учесть, то машинист уложится в установленный диапазон  $\pm 30\%$  [7].

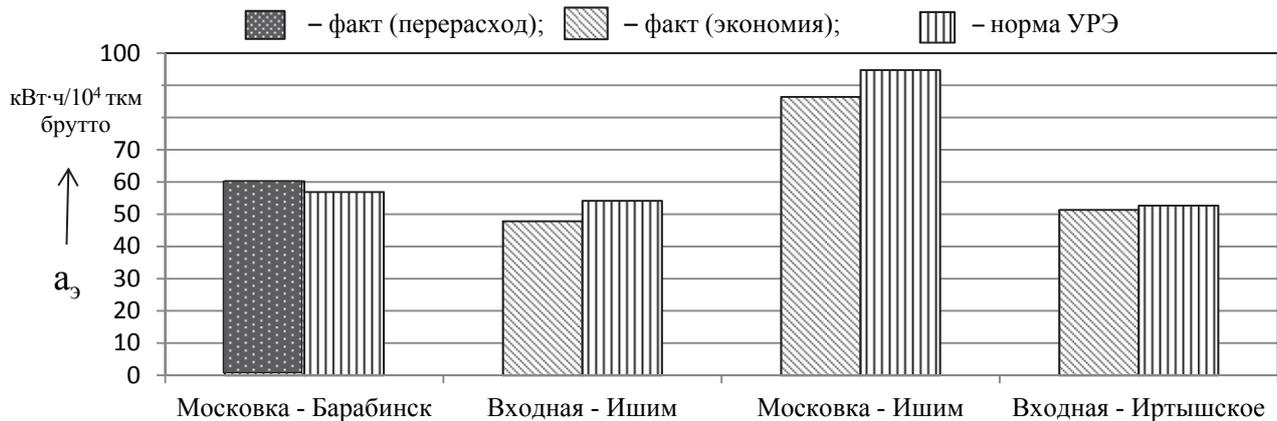


Рисунок 4 – Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС на плечах обслуживания в нечетном направлении

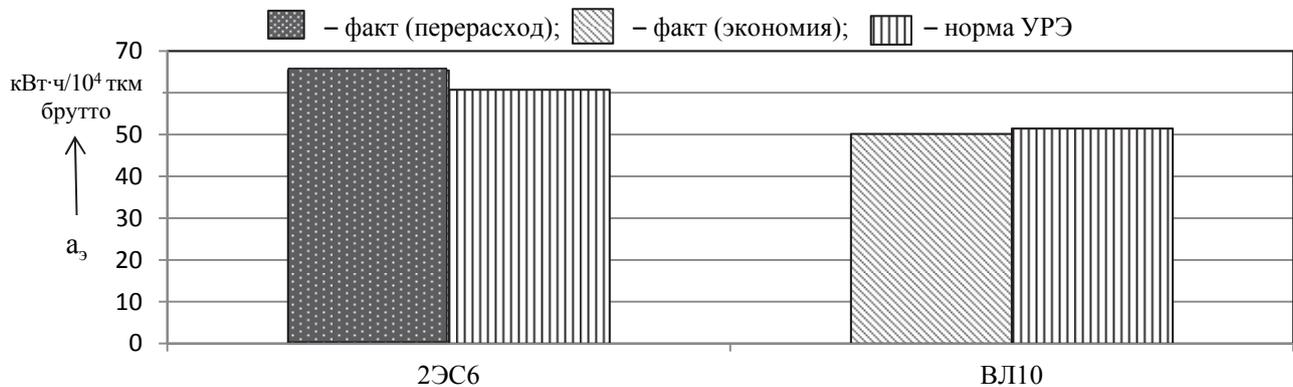


Рисунок 5 – Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС по сериям электропоездов на плече обслуживания локомотивных бригад Барабинск – Московка (нечетное)

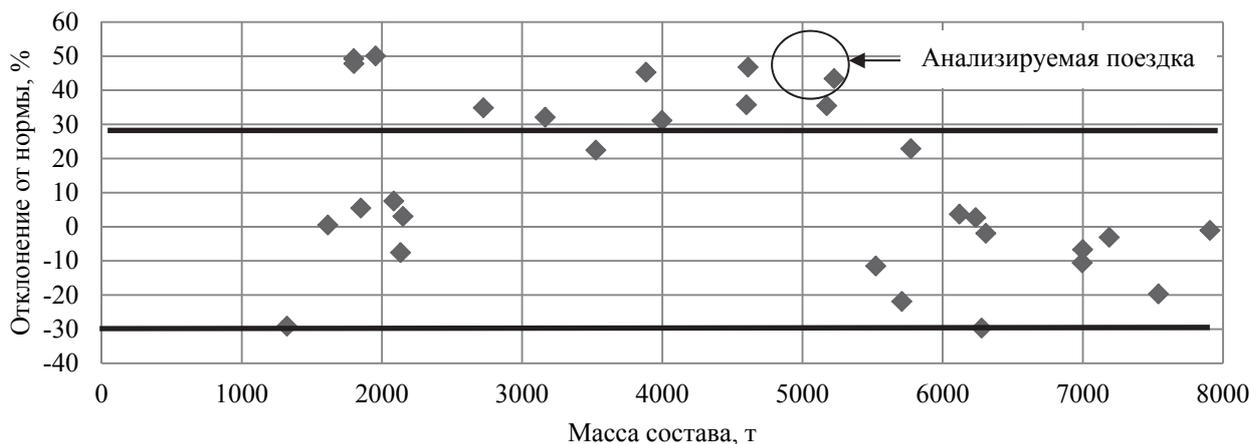


Рисунок 6 – Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС по поездкам на плече обслуживания Барабинск – Московка (нечетное)

В данном случае величину ущерба от непроизводительных потерь электроэнергии следует отнести на службу движения центральной дирекции управления движением, а также рекомендовать произвести корректировку графика движения с целью сокращения неграфиковых остановок, ограничений скорости движения на участке и т. д.

Анализ остальных поездок с перерасходом электроэнергии показал, что данные поезда следовали в рамках нормативного графика движения поездов, поэтому эти номера электровазозов и фамилии машинистов следует взять на контроль в последующих поездках с целью обоснования необходимости проведения непланового вида ремонта электровазозов и обучения машинистов рациональным режимам вождения поездов.

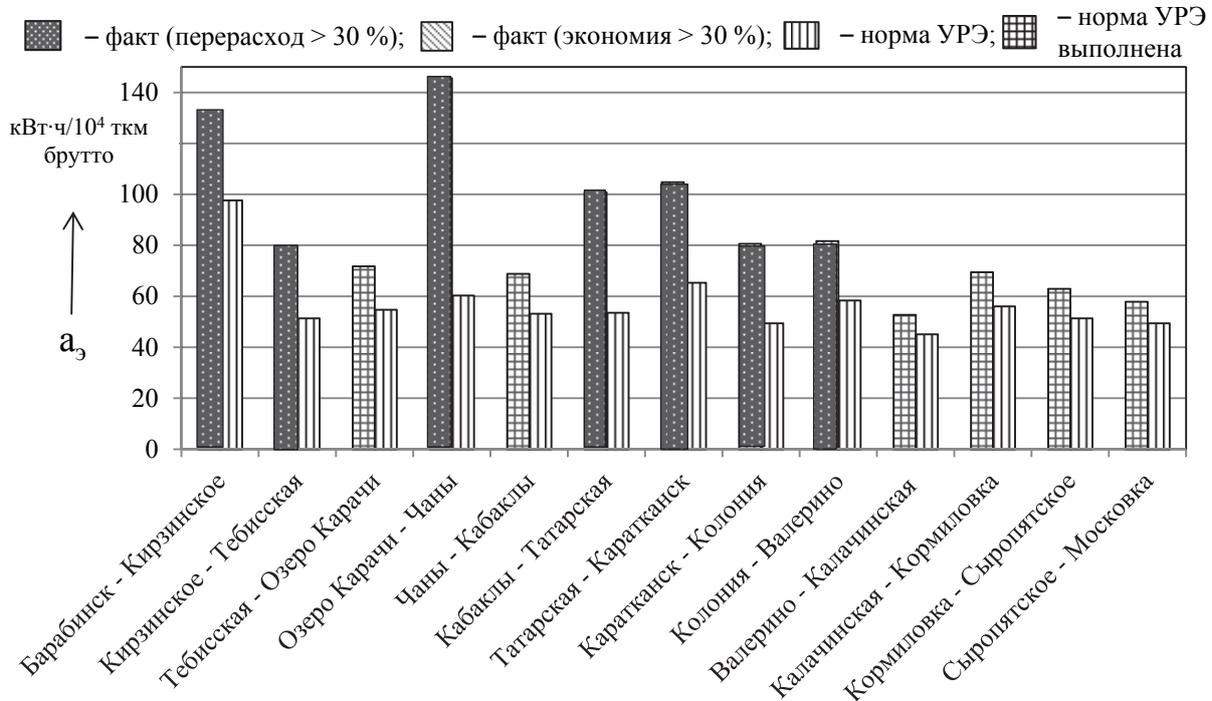


Рисунок 7 – Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС в исследуемой поездке локомотивной бригады в границах МПЗ на плече обслуживания Барабинск – Московка (нечетное)

Внедрение предлагаемого метода позволит обеспечить ежесуточный контроль непроизводительных потерь электроэнергии с отнесением их на участников перевозочного процесса и разрабатывать рекомендации по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС в зонах учета железной дороги, что даст возможность снизить непроизводительные потери и расход электроэнергии на тягу поездов.

### Список литературы

1. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.
2. Черемисин, В. Т. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – №1 (21). – С. 69 – 74.
3. Истомин, С. Г. Определение непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / С. Г. Истомин // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / РГУПС. – Ростов-на-Дону. – 2015. – № 2 (58). – С. 19 – 24.
4. Черемисин, В. Т. Оценка влияющих факторов на значение интегрального показателя энергетической эффективности электровазозов ЭП2К и 2ЭС6 на основе данных регистраторов параметров движения / В. Т. Черемисин, О. В. Гателюк, С. Г. Истомин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск. – 2015. – № 2. – С. 85 – 89.

5. Черемисин, В. Т. Разработка алгоритма определения причин ущерба и ответственных за него участников перевозочного процесса при невыполнении локомотивной бригадой удельной нормы электроэнергии на поездку / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2 (22). – С. 101 – 109.

6. Истомина, С. Г. Разработка технологии повышения эффективности использования электроэнергии электроподвижным составом в границах зон учета [Текст] / С. Г. Истомина // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 15 – 22.

7. Истомина, С. Г. Оценка энергетической эффективности работы электроподвижного состава в границах произвольных зон учета [Текст] / С. Г. Истомина // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 55 – 62.

## References

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

2. Cheremisin V. T., Ushakov S. Y., Istomin S. G. Controlling the irrational electricity consumption for train traction by the use of information-measuring systems of electricity metering on the rolling stock [Kontrol neratsionalnogo ispolzovaniya elektricheskoy energii na tyagu poezdov s primeneniem bortovyih informatsionno-izmeritelnykh kompleksov ucheta elektroenergii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 69 – 74.

3. Istomin, S. G. Determination of unproductive electric power losses using an electric rolling stock using on-board information and measurement systems for electricity metering [Opređenje neproizvoditel'nykh poter' elektroenergii elektropodvizhnym sostavom s ispol'zovaniem bortovykh informatsionno-izmeritel'nykh kompleksov ucheta elektroenergii]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of Rostov State Transport University*, 2015, no. 1 (58), pp. 19 – 24.

4. Cheremisin, V. T., Gateliuk O. V., Istomin S. G. Estimation of the influencing factors on the value of the integral indicator of the energy efficiency of electric locomotives EP2K and 2ES6 on the basis of the data of traffic parameters recorders [Otsenka vliiaushchikh faktorov na znachenie integral'nogo pokazatelya energeticheskoi effektivnosti elektrovozov EP2K i 2ES6 na osnove dannykh registratorov parametrov dvizheniia]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2015, no. 2, pp. 85 – 89.

5. Cheremisin, V. T., Istomin S. G. Development of an algorithm for determining the causes of damage and the participants in the transportation process responsible for it, if the locomotive crew does not fulfill the specific norm of electricity for the trip [Razrabotka algoritma opredeleniia prichin ushcherba i otvetstvennykh za nego uchastnikov perevozochnogo protsessa pri nevypolnenii lokomotivnoi brigadoi udel'noi normy elektroenergii na poezdku]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 101 – 109.

6. Istomin, S. G. Development of technology for increasing the efficiency of electric power use by the electric rolling stock within the boundaries of the metering areas [Razrabotka tekhnologii povysheniia effektivnosti ispol'zovaniia elektroenergii elektropodvizhnym sostavom v granitsakh zon ucheta]. *Materialy vsrossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tiagi poezdov»* (Materials of the all-Russian scientific and technical conference with international participation «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of traction»). – Омск, 2016, pp. 15 – 22.

7. Istomin, S. G. Estimation of the energy efficiency of the electric rolling stock within the limits of arbitrary accounting zones [Otsenka energeticheskoi effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava v granitsakh proizvol'nykh zon ucheta]. *Materialy nauchnoi konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific conference "Innovative projects and technologies in education, industry and transport"). – Омск, 2016, pp. 55 – 62.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Истомин Станислав Геннадьевич**

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 (3812) 31-34-19

E-mail: istomin\_sg@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Istomin Stanislav Gennadevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Lecturer of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.

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

E-mail: istomin\_sg@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Истомин, С. Г. Апробация метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги [Текст] / С. Г. Истомин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 64 – 74.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheremisin V. T., Istomin S. G. Approbation of the method of reducing the specific expenditure and non-productive loss of electricity in the boundaries of railway account zones. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 64 – 74 (In Russian).

УДК 621.331, 629.4

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

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

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

**Аннотация.** В статье выполнен анализ влияния параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на величину полезного использования энергии рекуперации и величину потерь электроэнергии, обусловленных протеканием энергии рекуперации по системе тягового электроснабжения к различным потребителям. Величина потерь энергии рекуперации определяет степень эффективности ее использования. Предлагаются подходы к последовательному определению эффективности использования энергии рекуперации и расчету численных значений величин, характеризующих параметры системы тягового электроснабжения, учет которых необходим для адекватного анализа потокораспределения энергии рекуперации. Определено, что для оценки влияния параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации достаточно использовать метод регрессионного анализа. Рассчитаны значения относительного сопротивления контактной сети в зависимости от типа контактной подвески и от схем питания тяговой сети. Показано, что параметры и режимы работы системы тягового электроснабжения оказывают влияние на потери в контактной сети, в выпрямительно-инверторных преобразователях и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока, на величину возврата энергии рекуперации по шинам тяговых подстанций и на относительное изменение потерь в системе тягового электроснабжения при применении рекуперативного торможения.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, схема питания, контактная подвеска, трансформаторы.

**Mikhail M. Nikiforov, Alexander S. Vilgelm, Vyacheslav I. Gutnikov**

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

## INFLUENCE OF PARAMETERS AND OPERATING MODES TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM ON EFFICIENCY OF ENERGY RECOVERY USE

**Abstract.** The article analyzes the influence of parameters and operating modes of traction power supply system on the value of the useful energy recovery and the amount of electricity losses caused by the energy recovery through

*the traction power system to various consumers. The amount of energy lost in recuperation determines the degree of efficiency of its use. The approaches to the sequential determination of the recuperation energy efficiency and the calculation of the numerical values of the quantities characterizing the parameters of the traction power supply system, which are necessary for an adequate analysis of the energy distribution flow distribution, are proposed. It is determined that it is sufficient to use the regression analysis method to estimate the influence of the parameters and operating conditions of the traction power system on the energy efficiency of the recovery. The values of the relative resistance of the contact network are calculated depending on the type of the contact suspension, as well as on the traction network supply circuits. It is shown that the parameters and operating modes of traction power supply system affect the losses in the contact network, the losses in rectifier-inverter converters and traction transformers of direct current traction substations, the amount of energy recovery from tires of traction substations, as well as the relative change in losses in the system traction power supply with the use of regenerative braking.*

**Keywords:** energy efficiency, traction power supply system, energy recovery, power scheme, contact suspension, transformers.

Вопрос оценки степени эффективности использования выработанной электроподвижным составом (ЭПС) энергии рекуперации для произвольного участка железной дороги является актуальным, так как позволяет определить технико-экономическую целесообразность внедрения на этом участке мероприятий по дальнейшему увеличению применения рекуперативного торможения или признать, что на нем полностью реализован потенциал использования рекуперативного торможения.

Эффективность взаимосвязанных процессов применения на ЭПС рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации на тягу поездов и нетяговые нужды зависит от большого числа разнообразных факторов, описанных в статьях [1, 2], что обуславливает сложность и трудоемкость проведения анализа. Среди прочих факторов существенное влияние на эффективность рекуперации оказывают параметры и режимы работы системы тягового электроснабжения (СТЭ). При этом до последнего времени влияние СТЭ учитывалось одним обобщенным показателем – уровнем напряжения на токоприемнике электровоза без оценки влияния параметров и режимов работы СТЭ участка. Такой подход не позволяет обеспечить решение главной задачи – обеспечить управление уровнем напряжения с целью повышения эффективности использования энергии рекуперации.

Для того чтобы оценить техническую эффективность использования энергии рекуперации, необходимо распределить весь объем выработанной ЭПС энергии рекуперации по составляющим, к которым можно отнести [3]

- потребление энергии рекуперации на собственные нужды электроподвижного состава;
- потери энергии рекуперации в контактной сети при передаче энергии рекуперации от рекуперирующего ЭПС к ЭПС, находящемуся в режиме тяги, и к тяговым подстанциям;
- потребление энергии рекуперации на тягу поездов ЭПС, находящихся в режиме тяги;
- потери энергии рекуперации в выпрямительно-инверторных преобразователях и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока при возврате энергии рекуперации из контактной сети;
- потребление энергии рекуперации на собственные нужды тяговых подстанций, на нужды железнодорожных и сторонних потребителей, получающих питание от электросетей районов электроснабжения и линий продольного электроснабжения;
- потери энергии рекуперации в понижающих трансформаторах тяговых подстанций постоянного и переменного тока при передаче энергии рекуперации через них в систему внешнего электроснабжения;
- возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.

Общий порядок оценки экономической эффективности использования энергии рекуперации изложен в статье [4]. Рассмотрим влияние параметров и режимов работы элементов СТЭ на техническую эффективность использования энергии рекуперации.

Эффективность использования энергии рекуперации зависит от параметров и режимов работы СТЭ. Общеизвестно, что наличие или отсутствие выпрямительно-инверторных пре-

образователей (ВИПов) на тяговых подстанциях постоянного тока является определяющим фактором, оказывающим влияние на эффективность применения рекуперативного торможения на участках с незначительными размерами движения поездов [5]. С увеличением размеров движения поездов роль ВИПов на участках постоянного тока снижается, а эффективность рекуперации для таких участков, а также участков переменного тока в большей степени определяется характеристиками контактной сети (типом контактной подвески, схемой питания и т. п.) и поездными условиями на участке (межпоездными интервалами, массой составов, скоростями движения и т. п.).

Предлагаемая методика оценки эффективности использования энергии рекуперации подразумевает распределение объемов энергии рекуперации по составляющим полезного потребления и потерь в устройствах электроснабжения последовательно по приведенному ниже алгоритму.

1. Выделяется общая величина эффективного использования энергии рекуперации, выработанной ЭПС на расчетном участке за расчетный период, за вычетом потерь энергии рекуперации в тяговой сети. Для определения этой величины используется коэффициент эффективности использования энергии рекуперации за вычетом потерь в тяговой сети, который определяется по формуле:

$$k_{\text{рек.эфф}}^{\text{КС}} = b + \sum_i (a_i \cdot X_i^{\text{эфф КС}}), \quad (1)$$

где  $b, a_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для соответствующего количества главных путей и влияющего фактора  $X_i^{\text{эфф КС}}$ ;

$X_i^{\text{эфф КС}}$  – значения факторов, влияющих на эффективность использования энергии рекуперации за вычетом потерь энергии рекуперации в тяговой сети.

2. Определяется объем энергии рекуперации, возвращенный на тяговые подстанции расчетного участка за расчетный период, с помощью коэффициента возврата энергии рекуперации:

$$k_{\text{рек}}^{\text{ЭЧЭ}} = d + \sum_i (c_i \cdot X_i^{\text{ЭЧЭ}}) + \sum_i (g_i \cdot (X_i^{\text{ЭЧЭ}})^2), \quad (2)$$

где  $d, c_i, g_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для соответствующего количества главных путей и влияющего фактора  $X_i^{\text{ЭЧЭ}}$ ;

$X_i^{\text{ЭЧЭ}}$  – значения факторов, влияющих на величину возврата энергии рекуперации на тяговые подстанции.

3. Определяется доля энергии рекуперации, потребленной на тягу поездов на расчетном участке за расчетный период электровозами в режиме тяги. Для этого по участкам постоянного тока с ВИПами на тяговых подстанциях и с наличием возврата энергии по счетчикам вводов ВИПов за расчетный период необходимо определить значения потерь энергии рекуперации в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций с использованием соответствующего коэффициента потерь энергии:

$$k_{\text{пот}}^{\text{ЭЧЭ}} = f + \sum_i (e_i \cdot X_i^{\text{пот ЭЧЭ}}), \quad (3)$$

где  $f, e_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для соответствующего количества главных путей и влияющего фактора  $X_i^{\text{пот ЭЧЭ}}$ ;

$X_i^{\text{пот ЭЧЭ}}$  – значения факторов, влияющих на величину энергии рекуперации, потребленной на тягу поездов.

4. Определяется разность потерь энергии в СТЭ для случаев с применением и без применения рекуперативного торможения с использованием соответствующего коэффициента разности потерь:

$$k_{\text{Дпот}}^{\text{СТЭ}} = l + \sum_i (q_i \cdot X_i^{\text{СТЭ}}), \quad (4)$$

где  $l, q_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для соответствующего количества главных путей и влияющего фактора  $X_i^{\text{СТЭ}}$ ;

$X_i^{\text{СТЭ}}$  – значения факторов, влияющих на величину разности потерь энергии в СТЭ для случаев с применением и без применения рекуперативного торможения.

Данные коэффициенты используются при последовательном определении структуры распределения выработанной ЭПС энергии рекуперации на участке с выделением ее эффективной доли.

Основой для разработки методики оценки эффективности использования энергии рекуперации являются имитационное моделирование работы электрифицированного участка и корреляционный анализ результатов, определяющий степень влияния различных факторов, в том числе параметров и режимов работы СТЭ, на эффективность использования энергии рекуперации, а именно на приведенные выше коэффициенты, определяющие эффективность использования энергии рекуперации.

Из числа параметров и режимов работы СТЭ в перечне влияющих факторов  $X_i^{\text{эфф КС}}$ ,  $X_i^{\text{ЭЧЭ}}$ ,  $X_i^{\text{пот ЭЧЭ}}$ ,  $X_i^{\text{СТЭ}}$  в предлагаемой методике учитываются следующие факторы:

для участков постоянного тока:

- тип контактной подвески (через относительное сопротивление контактной сети);
- средний коэффициент резерва (коэффициент остаточного ресурса) контактного провода расчетного участка;

- схема питания межподстанционных зон (через относительное сопротивление контактной сети);

- средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов;

- доля тяговых подстанций с ВИПами в общем числе тяговых подстанций на участке;

для участков переменного тока:

- тип контактной подвески (через относительное сопротивление контактной сети);

- схема питания межподстанционных зон (через относительное сопротивление контактной сети);

- средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов.

Коэффициенты корреляции между коэффициентами, определяющими эффективность использования энергии рекуперации, и влияющими факторами, полученными в ходе имитационного моделирования, для участков постоянного тока представлены в таблице 1, для участков переменного тока – в таблице 2.

С целью выявления наличия отличной от нуля корреляции между коэффициентами, определяющими эффективность использования энергии рекуперации, и влияющими факторами, т. е. существенного отличия от нуля значений коэффициентов корреляции, была выполнена проверка нулевой гипотезы о равенстве нулю коэффициента корреляции генеральной совокупности.

Для проверки нулевой гипотезы были вычислены наблюдаемые значения критерия:

$$T_{\text{набл}} = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (5)$$

где  $r_{xy}$  – значение коэффициентов корреляции;

$n$  – объем анализируемой выборки.

Наблюдаемые значения критерия представлены в таблицах 1, 2 в скобках для постоянного и переменного тока соответственно. Далее по таблице критических точек распределения

Стьюдента для заданного уровня значимости и числа степеней свободы  $k = n - 2$  были найдены критические точки  $t_{кр}(\alpha, k)$  для двусторонней критической области.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции (наблюдаемые значения критерия) между коэффициентами, определяющими эффективность использования энергии рекуперации, и влияющими факторами для участков постоянного тока

Коэффициенты, определяющие эффективность рекуперации	Коэффициент корреляции для соответствующего влияющего фактора					
	тип контактной подвески	коэффициент остаточного ресурса контактного провода	схема питания межподстанционных зон	средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов	средняя мощность потерь короткого замыкания понижающих трансформаторов	доля тяговых подстанций с ВИПами
$k_{рек.эфф}^{КС}$	<b>-0,72</b> (8,20)	0,16 (1,26)	<b>-0,34</b> (2,90)	0,13 (1,02)	0,15 (1,25)	0,22 (1,82)
$k_{рек}^{ЭЧЭ}$	<b>-0,35</b> (2,98)	0,07 (0,55)	<b>0,40</b> (3,50)	0,06 (0,49)	0,01 (0,11)	0,10 (0,81)
$k_{пот}^{ЭЧЭ}$	–	–	0,15 (1,22)	<b>0,36</b> (3,13)	0,05 (0,42)	-0,08 (0,63)
$k_{\Deltaпот}^{СТЭ}$	<b>0,47</b> (4,26)	0,06 (0,50)	-0,05 (0,43)	-0,13 (1,04)	-0,12 (0,93)	-0,10 (0,78)

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции (наблюдаемые значения критерия) между коэффициентами, определяющими эффективность использования энергии рекуперации, и влияющими факторами для участков переменного тока

Коэффициенты, определяющие эффективность рекуперации	Коэффициент корреляции для соответствующего влияющего фактора			
	тип контактной подвески	схема питания межподстанционных зон	средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов	средняя мощность потерь короткого замыкания понижающих трансформаторов
$k_{рек.эфф}^{КС}$	<b>-0,28</b> (2,80)	<b>0,44</b> (4,72)	-0,14 (1,33)	-0,01 (0,10)
$k_{рек}^{ЭЧЭ}$	<b>-0,33</b> (3,42)	<b>-0,60</b> (7,32)	0,03 (0,30)	0,07 (0,71)
$k_{\Deltaпот}^{СТЭ}$	<b>0,28</b> (2,79)	<b>-0,32</b> (3,31)	<b>0,22</b> (2,17)	0,11 (1,09)

Известно, что нулевая гипотеза отвергается при выполнении неравенства

$$|T_{набл}| > t_{кр} \quad (6)$$

В этом случае выборочный коэффициент корреляции можно считать значимым, а исследуемые величины коррелированными. В данном случае для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  двусторонней критической области и числа степеней свободы больше 120 критическая точка  $t_{кр} = 1,96$  и, следовательно, для участков постоянного и переменного тока значимыми коэффициентами корреляции являются коэффициенты выше данного значения (см. таблицы 1, 2).

В результате выполненных расчетов и проверки нулевой гипотезы установлено, что общая величина эффективного использования энергии рекуперации, выработанной ЭПС на расчетном участке за расчетный период, за вычетом потерь энергии рекуперации в тяговой сети и объем энергии рекуперации, возвращенный на тяговые подстанции, в значительной степени зависят от типа контактной подвески участка и схем питания межподстанционной зоны (МПЗ). Влияние остальных рассмотренных параметров и режимов работы СТЭ можно считать незначительным.

Из числа параметров и режимов работы СТЭ основным влияющим на разность потерь энергии в СТЭ фактором в случаях с применением и без применения рекуперативного торможения для участков постоянного тока является тип контактной подвески на участке, а для

участков переменного тока кроме этого важно учитывать схемы питания МПЗ и среднюю мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов.

Согласно разработанной методике оценки эффективности использования энергии рекуперации числовые значения указанных выше факторов, влияние которых признано значимым, т. е. факторов, используемых при расчете коэффициентов по формулам (1) – (4), предлагается определять в следующей последовательности.

Тип контактной подвески целесообразно учитывать через относительное сопротивление контактной сети, которое определяется по формуле, о. е.:

$$r_{\text{КП}} = \frac{\sum_{i=1}^I r_{\text{КП}i} \cdot L_{\text{тип КП}i}}{\sum_{i=1}^I L_{\text{тип КП}i}}, \quad (7)$$

где  $r_{\text{КП}i}$  – относительное сопротивление контактной сети для  $i$ -го типа контактной подвески расчетного участка, о. е.;

$L_{\text{тип КП}i}$  – длина участка пути  $i$ -го типа контактной подвески расчетного участка, км;

$I$  – количество типов контактной подвески расчетного участка.

Относительное сопротивление контактной сети зависит от рода тока СТЭ, типа контактной подвески и для участков переменного тока от количества главных путей. Принятые в рассматриваемой методике значения относительных сопротивлений для двухпутных участков переменного тока приведены в таблице 3. Наименьшие относительные сопротивления соответствует использованию подвесок типов М-120+2А185+ЭП и М-95+2А185+ЭП, значения которых приняты за единицу. Остальные варианты контактной подвески отличаются большими значениями относительного сопротивления.

Средний коэффициент остаточного ресурса контактного провода расчетного участка для участков постоянного тока предлагается определять по формуле:

$$k_{\text{рез}}^{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^I k_{\text{рез}i} \cdot L_i}{\sum_{i=1}^I L_i}, \quad (8)$$

где  $k_{\text{рез}i}$  – коэффициент остаточного ресурса контактного провода;

$L_i$  – длина участка пути  $i$ -го типа контактной подвески расчетного участка, км.

Таблица 3 – Значения относительного сопротивления контактной сети в зависимости от типа контактной подвески для двухпутных участков переменного тока, о. е.

Несущий троллейбус	Усиливающий провод (УП)	без УП	А185	2А185	А185+ЭП	2А185+ЭП
	ПБСМ-70		1,88	1,44	1,27	1,27
ПБСМ-95		1,80	1,41	1,27	1,24	1,07
М-95		1,54	1,32	1,20	1,15	1,00
М-120		1,49	1,29	1,17	1,12	1,00

Особенности схемы питания участка можно учесть через значение относительного сопротивления тяговой сети соответствующей схемы питания МПЗ расчетного участка, которое в этом случае определяется по формуле:

$$r_{\text{КП}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{ЭЧЭ}}-1} r_{\text{МПЗ } n} \cdot L_{\text{МПЗ } n}}{\sum_{n=1}^{N_{\text{ЭЧЭ}}-1} L_{\text{МПЗ } n}}, \quad (9)$$

где  $r_{\text{МПЗ } i}$  – значение относительного сопротивления тяговой сети для схемы питания  $n$ -й МПЗ расчетного участка;

$L_{\text{МПЗ } n}$  – длина  $n$ -й МПЗ расчетного участка, км;

$N_{\text{ЭЧЭ}}$  – количество тяговых подстанций, питающих расчетный участок.

Параллельный режим питания двухпутных участков и двусторонний режим питания однопутных участков приняты в качестве базовой схемы питания с относительным сопротивлением, равным 1,00. Значения относительных сопротивлений для различных схем питания, определенные для двухпутных участков, приведены в таблице 4.

Для оценки потерь энергии рекуперации в трансформаторах при возврате энергии на тяговые подстанции и, как следствие, оценки влияния этих потерь на эффективность рекуперации необходимо рассчитать среднюю мощность потерь холостого хода и короткого замыкания понижающих трансформаторов тяговых подстанций расчетных участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов расчетных участков постоянного тока. Средняя мощность потерь холостого хода определяется по формуле, кВт:

$$P_{\text{х.х}}^{\text{ср}} = \frac{\sum_{m=1}^{NT} P_{\text{х.х.тр } m}}{NT}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{х.х.тр } m}$  – значение мощности потерь холостого хода понижающих трансформаторов тяговых подстанций расчетных участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов расчетных участков постоянного тока, кВт;

$NT$  – количество понижающих трансформаторов тяговых подстанций расчетных участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов расчетных участков постоянного тока.

Таблица 4 – Значения относительного сопротивления контактной сети в зависимости от схем питания для двухпутных участков, о.е.

Режим питания тяговой сети	Для участков постоянного тока	Для участков переменного тока
Параллельный режим питания	1,0000	1,0000
Узловой режим питания	1,1370	1,1524
Двусторонний режим питания с разделом	1,2846	1,1427
Двусторонний раздельный режим питания	1,6024	1,2442
Двусторонний раздельный режим питания с разделом	1,9030	3,1012
Односторонний раздельный режим питания	3,3251	4,2409

Средняя мощность потерь короткого замыкания понижающих трансформаторов тяговых подстанций расчетных участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов расчетных участков постоянного тока определяется по формуле, кВт:

$$P_{\text{к.з}}^{\text{ср}} = \frac{\sum_{m=1}^{NT} P_{\text{к.з.тр } m}}{NT}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{к.з.тр } m}$  – значение мощности потерь короткого замыкания понижающих трансформаторов тяговых подстанций расчетных участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов расчетных участков постоянного тока, кВт.

Кроме того, необходимо определить долю тяговых подстанций с ВИПами на расчетном участке по формуле:

$$\gamma_{\text{ВИП}} = \frac{N_{\text{ВИП}}}{N_{\text{ЭЧЭ}}}, \quad (12)$$

где  $N_{\text{ВИП}}$  – количество тяговых подстанций, питающих расчетный участок, оборудованных ВИПами.

На основании представленных результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный алгоритм регрессионного анализа позволяет оценить влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на следующие составляющие энергии рекуперации:

- потери энергии рекуперации в тяговой сети;
- объем энергии рекуперации, возвращенный на тяговые подстанции расчетного участка;
- потери в выпрямительно-инверторных агрегатах и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока;
- относительное изменение потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения при применении рекуперативного торможения по сравнению с его отсутствием.

2. На уровень потерь энергии рекуперации в тяговой сети и объем энергии рекуперации, возвращенный на тяговые подстанции расчетного участка как постоянного, так и переменного тока, оказывают влияние

- тип контактной подвески;
- схема питания тяговой сети.

3. На потери в выпрямительно-инверторных агрегатах и тяговых трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока основное влияние оказывает средняя мощность потерь холостого хода понижающих трансформаторов.

4. Относительное изменение потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения при применении рекуперативного торможения в первую очередь зависит:

- на полигоне постоянного тока – от типа контактной подвески;
- на полигоне переменного тока – от типа контактной подвески, применяемой схемы питания тяговой сети и средней мощности потерь холостого хода понижающих трансформаторов.

5. Следует отметить незначительное влияние на эффективность использования энергии рекуперации таких факторов, как износ контактного провода до 30 % (который в выполненных исследованиях учитывался как коэффициент остаточного ресурса контактного провода и задавался в размере 0,7) или наличие ВИПов на участках постоянного тока в сравнении с такими факторами, как тип контактной подвески и схемы питания межподстанционной зоны. При этом следует помнить о том, что наличие ВИПов на полигоне постоянного тока является определяющим фактором, влияющим на эффективность применения рекуперативного торможения ЭПС, в особенности на отдельных участках, например, с небольшими размерами движения или повышенным уровнем напряжения в контактной сети.

### *Список литературы*

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

2. Никифоров, М. М. О необходимости разработки методики оценки энергоэффективности применения и использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и

на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 75 – 85.

3. Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2016. – № 1 (25). – С. 60 – 70.

4. Черемисин, В. Т. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 3 (50). – С. 95 – 99.

5. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – 176 с.

## References

1. Nikiforov M.M., Vilgelm A.S., Gutnikov V.I. Approbation of the railroads traction power supply system a direct current calculation model for assessment of recuperative braking energy efficiency potential [Aprobatsiia raschetnoi modeli sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia zheleznnykh dorog postoiannogo toka dlia otsenki potentsiala energoeffektivnosti rekuperativnogo tormozheniia]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2014, no. 1 (1), pp. 50 – 57.

2. Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. On the need to develop a methodology for evaluating apply energy efficiency and recovery energy use [O neobkhodimosti razrabotki metodiki otsenki energoeffektivnosti primeneniia i ispol'zovaniia energii rekuperatsii]. *Materialy nauchnoj konferencii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Proceedings of the conference «Innovation projects and technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2016. pp. 75 – 85.

3. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. Methodology for evaluating the energy efficiency of regenerative braking application and energy recovery use [Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniia re-kuperativnogo tormozheniia i ispol'zovaniia energii rekuperatsii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*. 2016, no. 1 (25), pp. 60 – 70.

4. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. Method of regenerative braking and energy recovery use cost-effectiveness calculating [Metodika rascheta ekonomicheskoi effektivnosti primeneniia reku-perativnogo tormozheniia i ispol'zovaniia energii rekuperatsii]. *Transport Urala – Transport of Urals*, 2016. no. 3(50), pp. 95 – 99.

5. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Kashtanov A.L., Vilgelm A.S. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti rekuperativnogo tormozheniia na poligone postoiannogo toka* (Increase of recuperative braking power efficiency at sites of a direct current). Omsk State Transport University. Omsk, 2016, 176 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Никифоров Михаил Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

### **Вильгельм Александр Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Nikiforov Mikhail Mikhailovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. Omsk, 644046 Russia.

Candidate of Technical Sciences, chief of research-and-production laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

### **Vilgelm Alexander Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», доцент, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

## Гутников Вячеслав Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: gutnikovvi@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, В. И. Гутников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 74 – 83.

35, Marx av. Omsk, 644046 Russia.

Candidate of Technical Sciences, senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», assistant professor, OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

## Gutnikov Vyacheslav Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av. Omsk, 644046 Russia.

Senior researcher associate of research-and-production laboratory «Energy saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: gutnikovvi@omgups.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. Gutnikov V. I. Influence of parameters and operating modes traction power supply system on efficiency of energy recovery use. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 74 – 83 (In Russian).

УДК 621.311

**В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак**

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

## ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО И ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы применения автоматизированных систем учета электроэнергии с целью контроля параметров работы системы тягового электроснабжения в условиях скоростного и тяжеловесного движения. В качестве основной системы контроля предложена автоматизированная система мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса. Результаты апробации системы рассмотрены на примере измерений в границах действующего участка железных дорог постоянного тока Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги.

*Ключевые слова:* тяжеловесное движение, скоростное движение, мониторинг, энергетические параметры, система тягового электроснабжения, автоматизация, учет электроэнергии.

**Vasily T. Cheremisin, Alexey L. Kashtanov, Vladislav L. Nezevak**

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

## ORGANIZATION OF CONTROL LIMIT OPERATION MODE TRACTION NETWORK IN THE SPEED AND HEAVY MOVEMENT

*Abstract.* The paper discusses the use of automated electricity metering systems to control parameters of the traction power supply system in terms of speed and heavy movements. As the main control system offered an automated

*system for monitoring energy efficiency of transportation process. The results of testing of the system considered in the measurement example, the boundaries of the active area of railways DC Shalya – Podvoloshnaya Sverdlovsk railway.*

**Keywords:** *heavyweight movement, high-speed movement, monitoring, energy options, traction power supply system, automation, electricity account*

Развитие скоростного и тяжеловесного движения на железных дорогах предъявляет повышенные требования к инфраструктуре, в том числе к системам тягового электроснабжения (СТЭ). В частности, рост нагрузок в абсолютном выражении, увеличение частоты их появления приводят к увеличению потерь мощности и напряжения в тяговой сети и оборудовании тяговых подстанций. Например, динамика изменения массы грузового поезда в ОАО «РЖД» показывает, что в период с 1998 по 2015 г. произошло увеличение массы с 3120 до 3966 т, т. е. более чем на 20 %. При этом организация тяжеловесного движения связана с использованием кратной тяги, что увеличивает нагрузку единичного поезда при следовании по межподстанционной зоне.

Указанные обстоятельства привели к обострению проблемы поддержания напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и заставили пересмотреть ряд нормативных требований, в частности, увеличения минимально допустимого напряжения на токоприемнике электроподвижного состава с 21 до 24 кВ на участках со скоростным и тяжеловесным движением.

Необходимо отметить, что развитие тяжеловесного движения и скоростного движения в России реализуется в условиях инфраструктуры, проектировавшейся в разные периоды прошлого столетия. Перспективные размеры движения, массы поездов и скорости движения, заложенные в проектах электрификации, не предусматривали организации тяжеловесного и скоростного движения, в связи с чем в последнее время был реализован ряд проектов по усилению систем тягового электроснабжения. Указанные проекты предусматривают работы как по переустройству тяговой сети, так и по реконструкции тяговых подстанций и внедрению дополнительных линейных устройств (постов секционирования, пунктов параллельного соединения и автотрансформаторных пунктов) [1].

Необходимость поддержания заданного уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава привела не только к необходимости усиления контактной подвески, но и к необходимости увеличения установленной мощности тяговых подстанций, а в случаях с недостаточно высокой мощностью питающих энергосистем, приведенных к шинам высокого напряжения подстанций, и к распространению различных вольтодобавочных устройств, призванных компенсировать потери мощности и напряжения в оборудовании подстанций.

Рост тяговой нагрузки на участках железных дорог усложняет работу релейных защит присоединений тяговых подстанций и линейных устройств, что обусловлено снижением чувствительности защиты и необходимостью использования интеллектуальных цифровых защит в условиях, когда уровень тяговой нагрузки сравним с минимальными токами коротких замыканий.

В случае необходимости оценки параметров работы системы тягового электроснабжения при различных режимах движения электроподвижного состава, в том числе и в условиях скоростного и тяжеловесного движения, в основном применяются расчетно-аналитические методы (например, с использованием программного комплекса «КОРТЭС»), а также результаты опытных поездок.

Опытные поездки, проводимые для исследования процессов в тяговой сети и подстанциях при увеличении массы поездов или пропуске скоростного электроподвижного состава, позволяют наиболее точно оценить уровень нагрузок тяговых подстанций и напряжение на токоприемниках электроподвижного состава. Указанную оценку параметров работы тяговых подстанций и, при необходимости, линейных устройств целесообразно проводить на основе системы мониторинга параметров работы системы тягового электроснабжения, позволяю-

щей определить все необходимые для контроля энергетические параметры работы тяговых подстанций, тяговой сети и электроподвижного состава.

В настоящее время в Омском государственном университете путей сообщения продолжаются работы по созданию единой автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП). Как и было заложено в концепции по созданию АСМЭПП [2], весь комплекс работ был разделен на три укрупненных направления:

- разработка необходимой нормативно-технической базы;
- разработка автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций (АСКУЭ ФКС) [3];
- разработка единой автоматизированной системы учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) [4].

В 2014 г. внедрение и апробация системы АСКУЭ ФКС были выполнены на действующем участке железных дорог постоянного тока Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги. Опытный полигон представляет собой участок, включающий в себя шесть тяговых подстанций (рисунок 1), на которых все вводы и фидеры 3,3 кВ оборудованы приборами учета электроэнергии, включенными в систему АСКУЭ ФКС.

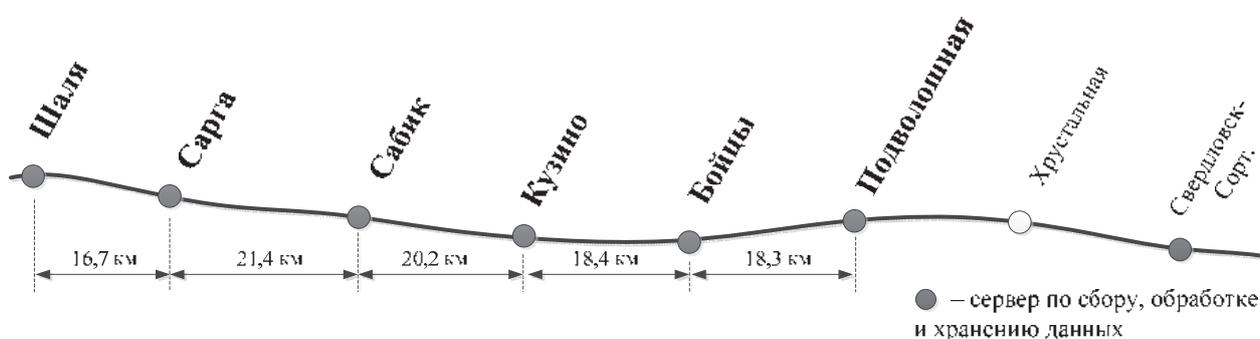


Рисунок 1 – Схема реализации проекта АСКУЭ ФКС на действующем участке Свердловской железной дороги

Реализованные в системе функции совместно с разработанной методологией по обработке данных синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе в режиме «реального времени» позволяют обеспечивать контроль энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения за счет наличия функций измерения напряжений и токов, учета активной энергии в прямом и обратном направлениях, выявления потерь электрической энергии в контактной сети и оборудовании тяговых подстанций с временным интервалом три секунды [5, 6]. Передача данных с регистраторов параметров движения обеспечивает контроль нагрузки и напряжения на токоприемнике электровоза.

На рисунке 2 представлен фрагмент графика изменения тока и напряжения на электровозе серии 2ЭС10 тяжеловесного поезда при движении по участку Екатеринбург – Шаля.

На фрагменте графика, представленного на рисунке 2, видно, что ток нагрузки поезда в данном случае превышает номинальный ток установленного на тяговой подстанции преобразовательного агрегата В-ТПЕД-3,15к-3,3к-М-УХЛ4.

Как уже было отмечено выше, система позволяет получить данные об изменении нагрузки и напряжения, усредненные по трехсекундным интервалам измерений. В качестве примера на рисунке 3 представлен фрагмент измерения токов присоединения тяговых подстанций, питающих одну из межподстанционных зон участка Екатеринбург – Шаля, для случая нахождения на зоне двух грузовых поездов с локомотивами серии 2ЭС10.

В настоящее время ведутся работы по подготовке планируемого эксперимента на Свердловской железной дороге, целью которого является определение эффективности применения рекуперативного торможения локомотивами различных серий и масс поездов.

Целью экспериментальных исследований является определение баланса отпущенной энергии в межподстанционную зону и составляющих потребления на тягу поездов, собственные нужды электроподвижного состава, энергии рекуперации и потери электрической энергии в контактной сети, а также баланса принятой электрической энергии по тяговым подстанциям на участке эксперимента и отпущенной в межподстанционные зоны по фидерам контактной сети.

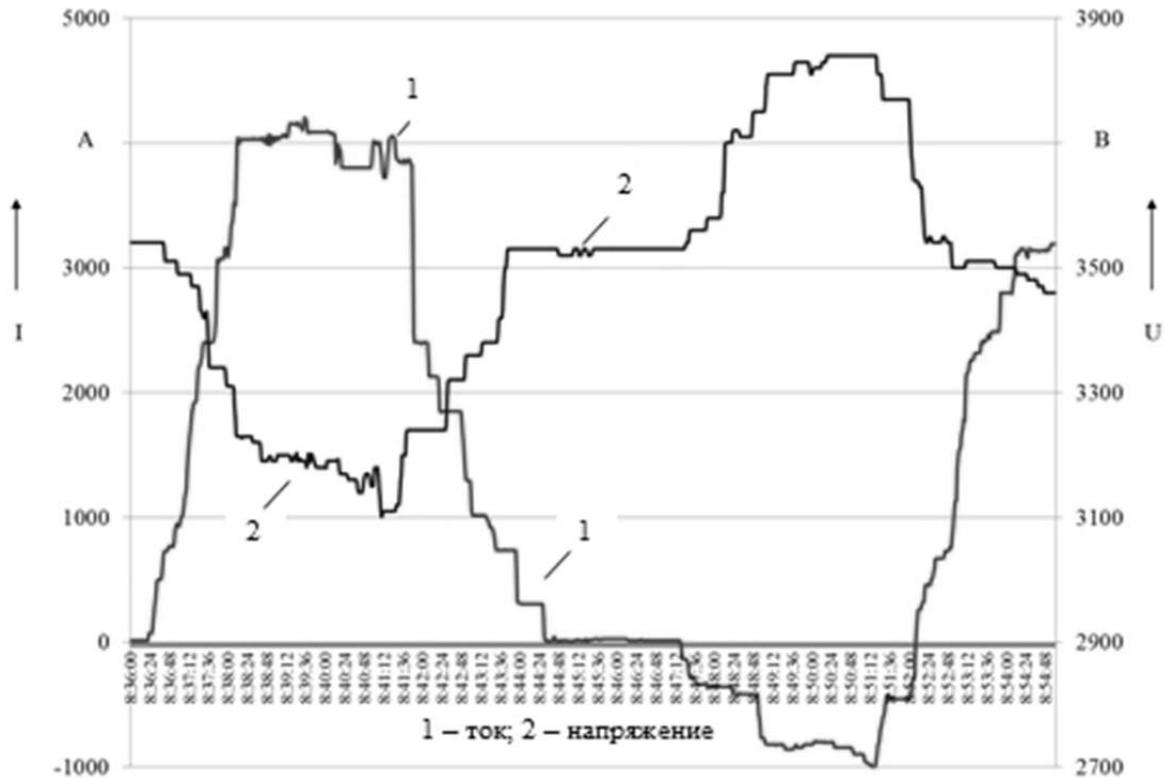


Рисунок 2 – График изменения тока и напряжения электровоза 2×2ЭС10 поезда массой 8 964 т

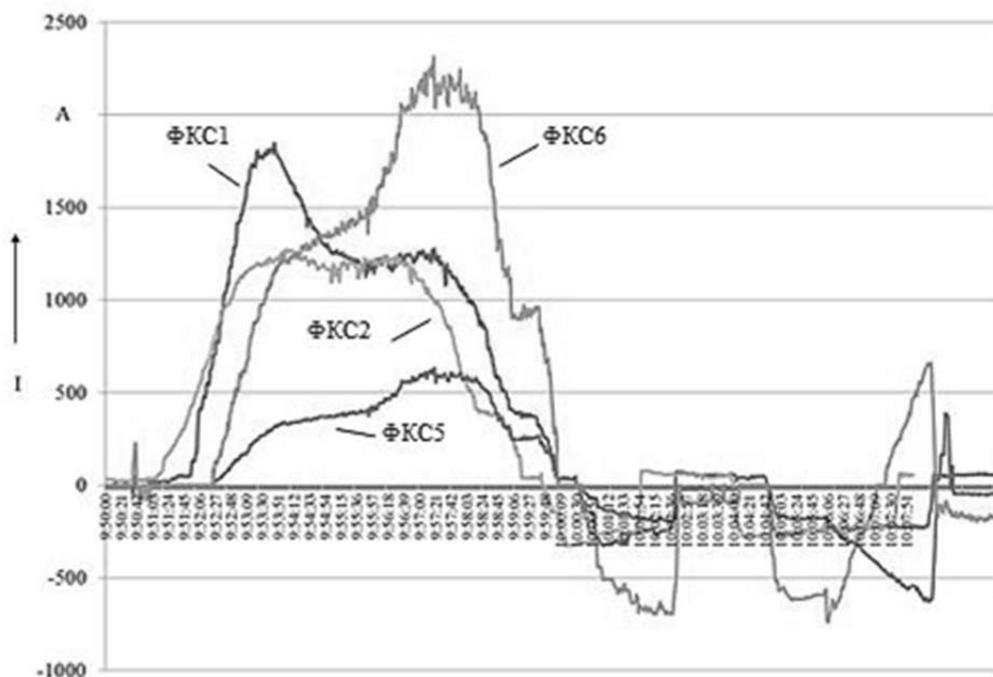


Рисунок 3 – График изменения токов нагрузки присоединений межподстанционной зоны участка Екатеринбург – Шаля

Задачей экспериментальных исследований является получение результатов синхронных измерений токов, напряжений, расхода и возврата электрической энергии на тягу поездов и расхода на собственные нужды электроподвижного состава по данным АСУЭ ФКС и данным регистраторов параметров движения со спутниковым позиционированием на электроподвижном составе. Программа эксперимента включает в себя измерения при следующих эксплуатационных режимах: организация движения грузовых поездов с применением рекуперативного торможения в штатном режиме и движения грузовых поездов без применения рекуперативного торможения. В ходе эксперимента планируются пропуск одиночного тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне и измерение основных энергетических параметров тяговых подстанций.

В рамках существующих систем учета режимов работы системы тягового электроснабжения особая роль в вопросе контроля энергетических параметров отводится созданию системы контроля учета электрической энергии. Следует отметить, что в настоящее время система АСКУЭ используется только как инструмент по учету электрической энергии, оставляя незатронутыми направления, реализация которых возможна за счет наличия такой функции АСКУЭ, как непрерывный контроль энергетических параметров работы системы тягового электроснабжения. В то же время система АСКУЭ, обеспечивая постоянный мониторинг энергетических параметров, является базой при реализации возможности построения реальной математической модели системы тягового электроснабжения и построения интеллектуальной сети Smart Grid [7, 8] (рисунок 4), работа которой будет направлена на повышение эффективности энергопотребления на тягу поездов, в том числе и в условиях скоростного и тяжеловесного движения.

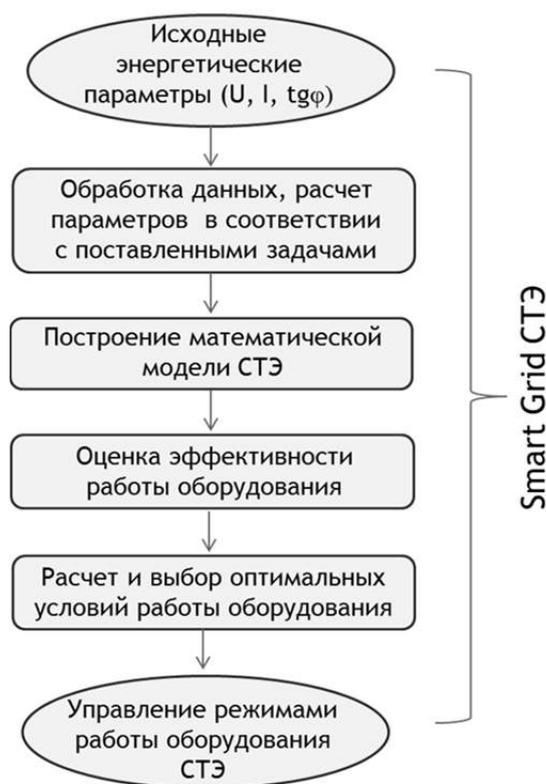


Рисунок 4 – Структура управления режимами работы оборудования тяговых подстанций с применением интеллектуальной сети

К одному из направлений развития железнодорожного транспорта относится расширение полигонов железных дорог с применением поездов повышенной массы и скоростного движения. Учитывая то, что система тягового электроснабжения не является источником бесконечной мощности, весьма актуальным становится вопрос контроля предельных режи-

мов работы тяговой сети. Решение поставленной задачи целесообразно рассматривать в рамках развития и расширения функций автоматизированных систем учета электроэнергии.

## Список литературы

1. Каштанов, А. Л. Оценка эффективности внедрения модульных постов секционирования 27,5 кВ с автоматическим управлением схемами питания тяговой сети [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Актуальные вопросы современных научных исследований: Материалы всерос. науч.-практ. конф. / Челябинский ин-т путей сообщения. – Челябинск, 2016. – С. 39 – 42.
2. Черемисин, В. Т. Концепция Единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, С. Ю. Ушаков // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2013. – № 4 (39). – С. 83 – 87.
3. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2015. – № 2 (45). – С. 67 – 70.
4. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3 (15). – С. 108 – 114.
5. Комяков, А. А. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем [Текст] / А. А. Комяков, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2015. – № 2 (46). – С. 137 – 143.
6. Istomin, S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn [Текст] / S. Istomin, V. Nezevak // Elektrische Bahnen / Oldenbourg Industrieverlag GmbH. – München. – 2015. – № 4. – P. 186 – 189.
7. Незевак, В. Л. Основные подходы к использованию накопителей электроэнергии в сетях smart grid системы тягового электроснабжения [Текст] / В. Л. Незевак // Труды междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2015» / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 103, 104.
8. Комяков, А. А. Методы и алгоритмы построения математических моделей процесса электропотребления на тягу поездов и нетяговые нужды [Текст] / А. А. Комяков, А. Л. Каштанов, В. В. Эрбес // Электрификация и развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: Тезисы докладов VIII междунар. симпозиума Eltrans-2015 / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 42, 43.

## References

1. Kashtanov A. L., Nikiforov M. M. Evaluating the effectiveness of the implementation of modular partitioning of posts 27.5 kV with automatic control of the traction power supply circuits [Otsenka effektivnosti vnedreniia modul'nykh postov seksionirovaniia 27,5 kV s avtomaticheskim upravleniem skhemami pitaniia tiagovoi seti]. *Materialy vseros. nauch.-prakt. Konferentsii «Aktual'nye voprosy sovremennykh nauchnykh issledovaniï»* (Materials Int. scientific-practical conference «Topical issues of modern scientific research»). – Chelyabinsk, 2016, pp. 39 – 42.
2. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Ushakov S.Y. The concept of unified automated electric power accounting system for traction [Kontseptsiia Edinoi avtomatizirovannoi sistemy ucheta elektricheskoi energii na tiagu poezdov]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2013. No. 4 (39), pp. 83 – 87.

3. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nikiforov M. M. Improving the energy efficiency of electric drive with the introduction of electricity monitoring feeders catenary [Povyshenie energeticheskoi effektivnosti elektrotiagi pri vnedrenii monitoringa elektroenergii na fiderakh kontaktnoi seti]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2015. No. 2 (45), pp. 67 – 70.

4. Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nikiforov M. M. A single automated system of electricity metering in the electric rolling stock (EASUE EPS) DC [Edinaia avtomatizirovannaia sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoiannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 3 (15), pp. 108 – 114.

5. Komiakov A. A., Nezevak V. L., Erbes V. V. Evaluating the effectiveness of parallel operation of rectifiers traction substations based measuring systems data [Otsenka effektivnosti parallel'noi raboty vypriamitel'nykh preobrazovatelei tiagovykh podstantsii na osnove dannykh izmeritel'nykh sistem]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – The journal of Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015. No. 2 (46), pp. 137 – 143.

6. Istomin, S. G., Nezevak V. L. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn. *Elektrische Bahnen*, 2015, no. 4, pp. 186 – 189.

7. Nezevak V. L. Basic approaches to the use of energy storage in the smart grid networks, traction power supply system [Osnovnye podkhody k ispol'zovaniiu nakopitelei elektroenergii v setiakh smart grid sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2015»* (Proceedings of the Int. scientific-practical conference "Transport 2015"). – Rostov-on-Don, 2015, pp. 103 – 104.

8. Komiakov A. A., Kashtanov A. L., Erbes V. V. Methods and algorithms for constructing mathematical models of energy consumption process for traction trains and not traction needs [Metody i algoritmy postroeniia matematicheskikh modelei protsessa elektropotrebleniia na tiagu poezdov i netiagovye nuzhdy]. *Tezisy dokladov VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans-2015 «Elektrifikatsiia i razvitie elektroenergeticheskoi infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta»* (Abstracts of the VIII Int. symposium Eltrans-2015 «Electrification and development of electric power infrastructure and rolling stock of high-speed and high-speed rail» ). – St. Petersburg, 2015, pp. 42 – 43.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

### Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», старший научный сотрудник научно-исследовательской части, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Cheremisin Vasily Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director Of Institute Of Power Saving Technologies On Railways, chief of the department «Rolling Stock Of Electric Railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

### Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher Of Research Sector, The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

## Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

## Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).  
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, senior researcher of research sector, OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Черемисин, В. Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 83 – 90.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheremisin V. T., Kashtanov A. L., Nezevak V. L. Organization of control limit operation mode traction network in the speed and heavy movement. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 83 – 90 (In Russian).

УДК 656.256:004.382.7:004.415.2

## Д. В. Борисенко, В. А. Осин

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

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

*Аннотация.* В микропроцессорных системах интервального регулирования движения поездов основные функции реализованы за счет программного обеспечения. Применяемый в профильных учебных заведениях подход к подготовке специалистов в этой области, основанный на исследовании функций действующего оборудования, не является в полной мере эффективным. В этой статье мы предлагаем применить практический подход, подразумевающий самостоятельную разработку, реализацию и проверку студентами алгоритмов интервального регулирования движения поездов. Для этой цели мы предлагаем использовать специальный стенд. Его функциональная схема и некоторые результаты опытной разработки представлены в данной статье.

*Ключевые слова:* автоматическая блокировка, учебный стенд, светофор, рельсовая цепь, числовой код, генератор, дешифратор, микропроцессор.

## Dmitry V. Borisenko, Viktor A. Osin

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

## TEACHING AND LEARNING MICROPROCESSOR BLOCK SIGNALLING SYSTEMS BY PRACTICE

*Abstract.* In microprocessor automatic block signalling (ABS) systems all the basic functionality is implemented in software. Current technique used by Russian educational organisations for training of engineering staff is solely based on functionality exploration of the microprocessor ABS equipment. We suggest that this approach is not sufficiently effective and could be improved. In our view, the improvement could be achieved by addition of extensive ABS algorithm development practice to the Railway Signalling Engineering curriculum. In this article, we present a prototype of a special microprocessor learning board, which supports development and debugging of various ABS algorithms. Along with the functional diagram, we give some technical details and present preliminary results of implementing and using this prototype.

*Keywords:* automatic block signalling, learning board, signal, track circuit, pulse code, transmitter, decoder, microprocessor.

Системы интервального регулирования движения поездов (СИРДП) предназначены для организации эффективного и безопасного движения поездов по перегонам между станциями. Различные модификации таких систем широко применяются во всем мире, в том числе и на железных дорогах Российской Федерации [1 – 4].

Современные тенденции в развитии СИРДП заключаются в применении автоматической блокировки на основе микропроцессорной элементной базы [2]. Это позволяет обеспечить улучшение технико-эксплуатационных и экономических показателей: повышение надежности, уменьшение времени восстановления после отказа, снижение затрат на обслуживание.

Однако темпы внедрения систем нового поколения невысоки. Это обусловлено традиционно высокой стоимостью, не позволяющей выполнить одновременную модернизацию СИРДП на достаточно протяженном участке железной дороги. Одной из причин низких темпов внедрения систем нового поколения является традиционный консерватизм специалистов и руководителей, предпочитающих старые проверенные технические решения новым, пусть даже более эффективным. Важным фактором в сложившейся ситуации, на взгляд авторов, является отсутствие на предприятиях железнодорожного транспорта России достаточного количества квалифицированных технических специалистов в области микропроцессорных автоблокировок. В связи с этим следует рассмотреть специфику и проблемы изучения таких систем в профильных высших учебных заведениях.

Как правило, изучение микропроцессорных автоблокировок основано на курсе лабораторных работ. В качестве лабораторного обеспечения используется оборудование, аналогичное тому, что находится в настоящий момент в эксплуатации. Такой подход оправдан для релейных систем. В отличие от релейных СИРДП, где функциональность реализована путем электрического соединения базовых элементов, в микропроцессорных системах основные функции реализованы с помощью программного обеспечения, которое не доступно для изучения. Фактически, оборудование микропроцессорной автоблокировки рассматривается как «черный ящик», а суть лабораторных работ заключается в подтверждении заявленных функций и изучении схем подключения. При этом базовые принципы реализации функций автоблокировки микропроцессорными средствами остаются неизученными.

Существенное повышение эффективности образовательного процесса может быть достигнуто за счет применения специального лабораторного оборудования (стендов), адаптированного для изучения методов программной реализации функций автоблокировки. Принимая во внимание высокую стоимость, а зачастую недоступность и достаточно высокую сложность средств разработки и отладки программного обеспечения для действующих микропроцессорных автоблокировок, лабораторное оборудование предлагается изготавливать на основе микропроцессорных комплектов общего назначения или открытых образовательных микропроцессорных платформ.

Очевидной представляется типовая структура такого стенда. В качестве базового элемента стенда следует принять модель блок-участка, содержащую на достаточном уровне детализации все типовые элементы автоблокировки: рельсовую цепь, светофор, управляющую логику, интерфейс для обмена сигналами с соседними блок-участками. Кроме этого дополнительно должны быть предусмотрены средства для программирования управляющей логики (программатор). Обобщенная структурная схема модели блок-участка приведена на рисунке 1. Соединенные последовательно модели блок-участков образуют пригодную для обучения модель перегона, оборудованного автоблокировкой.

Процесс обучения предлагается организовать путем разработки и экспериментальной проверки следующих алгоритмов:

- интервального регулирования движения поездов;
- обнаружения поезда на блок-участке;
- взаимодействия сигнальных точек автоблокировки.

Следует отметить, что при реализации структуры, представленной на рисунке 1, потребуется проработка вопроса согласования управляющей логики с рельсовой цепью. Кроме то-

го, в зависимости от типа автоблокировки, реализуемой стандом, интерфейс для обмена сигналами с соседними блок-участками может быть выполнен в виде проводного соединения или путем подключения к рельсовой линии соседнего блок-участка.



Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема модели блок-участка

С целью демонстрации изложенной выше концепции авторами принято решение применить ее для построения схемы станда микропроцессорной числовой автоблокировки. Выбор типа автоблокировки обусловлен несколькими факторами: распространенностью на железных дорогах России и оригинальным принципом обмена информацией между соседними сигнальными точками, программная реализация которого представляет определенный академический интерес.

В числовой автоблокировке информация о показаниях светофора передается через рельсовую цепь в виде кодового сигнала. Короткое замыкание рельсовой цепи колесными парами поезда приводит к пропаданию в ней, на стороне приемника, кодового сигнала, что и позволяет зафиксировать въезд поезда на блок-участок. Подробно принципы построения числовой автоблокировки изложены в работах [2, 3].

Элементы обобщенной схемы на рисунке 1 подлежат уточнению. Один из вариантов уточненной схемы, которую можно считать функциональной, приведен на рисунке 2.

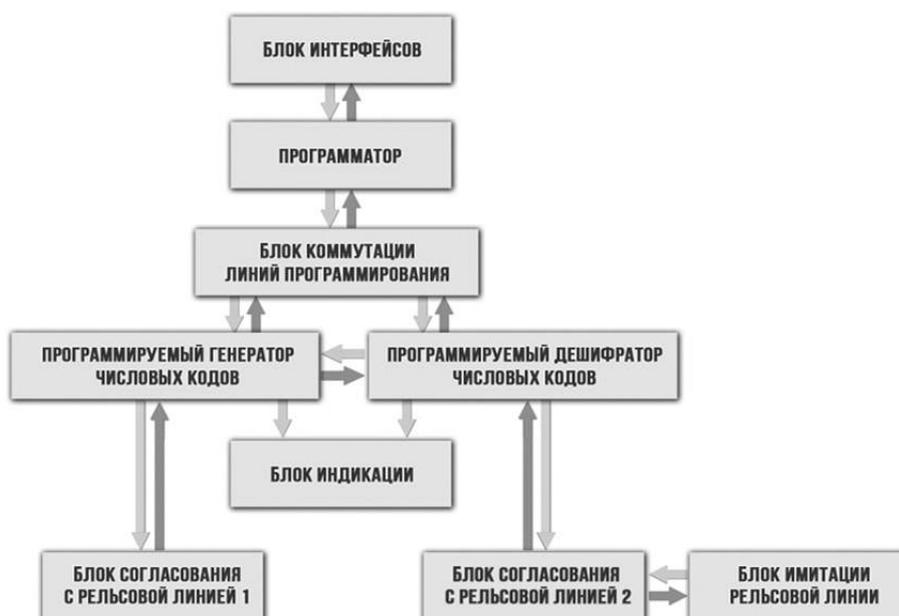


Рисунок 2 – Функциональная схема модели блок-участка числовой автоблокировки

Управляющую логику сигнальной точки целесообразно представить в виде двух взаимодействующих программируемых блоков: дешифратора и генератора числовых кодов. На ос-

нове расшифрованного дешифратором кода (или его отсутствия), принятого из рельсовой цепи блок-участка, осуществляется управление генератором, сигнал которого передается в рельсовую цепь предыдущего блок-участка.

Для программирования дешифратора и генератора применяются программатор и блок коммутации линий программирования. Такая конфигурация позволяет использовать один и тот же программатор для загрузки исполняемого программного кода как в генератор, так и в дешифратор. Это может быть продиктовано экономическими соображениями. С помощью блока интерфейсов программатор предлагается подключать к персональному компьютеру, на котором будет разрабатываться учебный исполняемый программный код генератора и дешифратора.

Блок индикации предназначен для отображения работы управляющей логики блок-участка. В нем целесообразно предусмотреть индикацию следующих параметров: сигнал, принимаемый из рельсовой цепи блок-участка; результат расшифровки дешифратором принятого сигнала; показание светофора; кодовый сигнал, выдаваемый генератором в рельсовую цепь предыдущего блок-участка.

Блок имитации рельсовой линии в соответствии со своим названием представляет собой упрощенную физическую модель, позволяющую имитировать короткое замыкание рельсов колесными парами проходящего поезда. Так как при подобном физическом моделировании значения электрических сигналов могут выходить далеко за пределы, установленные для элементной базы генератора и дешифратора, то в схеме предлагается выделить блоки согласования с рельсовой линией. Один из них предназначен для согласования сигналов собственной рельсовой линии блок-участка с дешифратором, второй – для согласования сигналов генератора с рельсовой линией предыдущего блок-участка.

В качестве микропроцессорной элементной базы при реализации стенда принято решение использовать микроконтроллеры AVR фирмы Atmel, а именно ATmega328P. Это обусловлено рядом факторов: относительно невысокой стоимостью, доступностью документации [5], простотой программирования, обширным опытом применения, который накоплен российскими разработчиками. Кроме того, микроконтроллер ATmega328P лежит в основе популярной учебной микропроцессорной платформы Arduino [6] и хорошо знаком множеству непрофессиональных разработчиков, в том числе и студентам.

Программируемые дешифратор и генератор реализованы на отдельных микроконтроллерах ATmega328P. Следует заметить, что вычислительных ресурсов одного микроконтроллера вполне достаточно для одновременного выполнения функций как генератора, так и дешифратора. Однако такая конфигурация потребовала бы при разработке учебных алгоритмов дополнительно решать вопрос конкурентного доступа к ресурсам микроконтроллера, что, на взгляд авторов, отвлекло бы обучаемых от основной задачи обучения.

Для загрузки исполняемого программного кода в микроконтроллеры генератора и дешифратора предложено применить программатор USBasp [7]. Этот программатор построен на основе микроконтроллера ATmega8, имеет простую схему и позволяет запрограммировать микроконтроллеры AVR с помощью персонального компьютера через интерфейс USB. Таким образом, программатор USBasp дополнительно выполняет функции блока интерфейсов.

Блок коммутации линий программирования может быть реализован с помощью обычных двухпозиционных переключателей, переключателей или более сложным способом – с помощью управляемых коммутаторов сигналов.

Индикацию работы стенда целесообразно выполнить с помощью светодиодов разных цветов, подключаемых к выводам микроконтроллеров.

Имитация рельсовых цепей может быть выполнена с различной степенью детализации. Это, естественно, определит количество и стоимость элементов, задействованных для реализации блоков имитации рельсовой линии и согласования с рельсовой линией. В простейшем случае имитацию рельсовой линии можно выполнить с помощью рельсовых секций модельной электрической железной дороги. При этом источником электрического сигнала в рельсо-

вой линии выступает непосредственно микроконтроллер, реализующий генератор числовых кодов, а блок согласования с рельсовой линией представляет собой токоограничивающий резистор.

Выполнена разработка макетов трех блок-участков, образующих при последовательном соединении перегон. Для макета каждого блок-участка все функциональные блоки схемы на рисунке 2, кроме блока имитации рельсовой линии, реализованы на печатных платах размером  $90 \times 100$  мм. Эскиз печатной платы с соответствующими пояснениями приведен на рисунке 3.

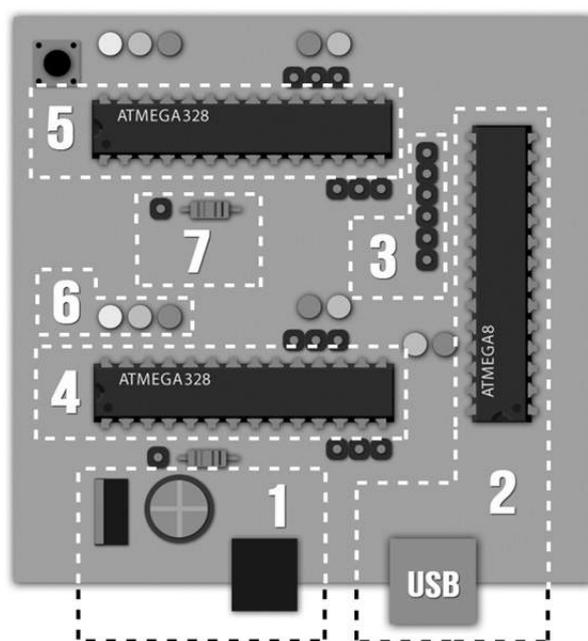


Рисунок 3 – Эскиз печатной платы макета перегона в составе стенда для изучения микропроцессорных СИРДП: 1 – блок питания; 2 – программатор; 3 – блок коммутации линий программирования; 4 – программируемый дешифратор числовых кодов; 5 – программируемый генератор числовых кодов; 6 – блок индикации; 7 – блок согласования с рельсовой линией

С целью проверки работоспособности изготовленных макетов и подтверждения их пригодности для обучения разработаны два набора алгоритмов: генерации и дешифрации числовых кодов. Для разработки этих алгоритмов могут быть применены несколько методов: аппаратное измерение длительности импульсов и интервалов, программная эмуляция трансмиттера и дешифраторной ячейки, представление генератора и дешифратора в виде конечных автоматов. Наиболее перспективным, на взгляд авторов, является последний метод, так как представление алгоритмов в виде конечных автоматов открывает широкие возможности для их автоматической верификации методом Model checking [8].

Для описания работы генератора и дешифратора числовых кодов как конечных автоматов, обладающих временными характеристиками, предлагается использовать формальную модель временного автомата. Теоретический аппарат временных автоматов к настоящему времени хорошо развит [9, 10] и широко применяется для спецификации и верификации систем реального времени [8].

Дальнейшие рассуждения построены на основе следующего определения. Временной автомат – это конечный автомат, дополненный конечным множеством таймеров, которые могут принимать вещественные значения [9]. Таймеры могут быть сброшены в 0 (независимо друг от друга) при совершении автоматом переходов и выполняют отсчет времени, прошедшего с момента последнего сброса. С переходами автомата ассоциированы временные ограничения, накладываемые на значения таймеров: переход может произойти только в случае, если текущие значения таймеров удовлетворяют этим ограничениям.

Следует заметить, что математическое определение временного автомата дано на основе  $\omega$ -автоматов Бюхи и Мюллера в [9]. Циклическая структура числовых кодов вполне соотносится с этими вычислительными моделями. Для практического применения при описании алгоритмов генерации и дешифрации числовых кодов потребуются детерминированный временной автомат, который формально представляется кортежем  $\langle \Sigma, S, S_0, C, E, F \rangle$ .

Конечный алфавит  $\Sigma$  содержит два символа –  $\{a, b\}$ , где символ  $a$  соответствует изменению входного (выходного) сигнала дешифратора (генератора) с 0 на 1, а символ  $b$  соответствует обратному изменению – с 1 на 0.

Конечное множество  $S$  внутренних состояний автомата содержит состояния соответствующие этапам формирования числового кода (импульсам и интервалам), а также начальное состояние  $S_0$ .

Конечное множество таймеров  $C = \{x\}$  для решаемой задачи содержит единственный таймер  $x$ , обеспечивающий контроль длительности текущего импульса или интервала.

Множество  $E$  переходов между состояниями конечного автомата состоит из элементов вида  $\langle s, s', \sigma, \lambda, \delta \rangle$ , которые описывают переходы из состояния  $s$  в состояние  $s'$  при поступлении символа  $\sigma$ . При этом множество  $\lambda$  идентифицирует таймеры, подлежащие сбросу (в данном случае для каждого перехода  $\lambda = C$ ), а  $\delta$  – временное ограничение на значения таймеров из  $C$ , которое должно удовлетворяться для выполнения перехода.

Множество  $F$  допускающих состояний автомата в случае, если он задан на основе  $\omega$ -автомата Бюхи (временной автомат Бюхи), является критерием успешной дешифрации числового кода и содержит те состояния автомата, в которые он должен переходить бесконечно часто, если на его вход подан сигнал соответствующего числового кода. Если временной автомат задан на основе  $\omega$ -автомата Мюллера (временной автомат Мюллера), то  $F$  представляет собой множество допускающих семейств состояний. При поступлении на вход автомата сигнала соответствующего числового кода он должен зафиксироваться в одном из этих семейств. Генерация числового кода выполняется на основе таблицы переходов временного автомата, и параметр  $F$  не требуется.

С учетом введенных обозначений цикл сигналов числовых кодов КЖ и Ж представляется в виде следующего временного слова:

$$(a, \tau_1) \rightarrow (b, \tau_2) \rightarrow (a, \tau_3) \rightarrow (b, \tau_4) \rightarrow \dots,$$

где  $\tau_i$  – момент времени, в который в кодовом цикле появляется импульс или интервал.

Вид кода определяется соотношениями между  $\tau_i$  соседних букв в слове. Так, для кодов КЖ и Ж (здесь и далее использованы временные характеристики кодового путевого трансмиттера КПП-5 [2, 3]) должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{array}{llll} \text{КЖ:} & \tau_2 = \tau_1 + 0,23; & \tau_3 = \tau_2 + 0,57; & \tau_4 = \tau_3 + 0,23; & \tau_5 = \tau_4 + 0,57; \\ \text{Ж:} & \tau_2 = \tau_1 + 0,38; & \tau_3 = \tau_2 + 0,12; & \tau_4 = \tau_3 + 0,38; & \tau_5 = \tau_4 + 0,72, \end{array}$$

где  $\tau_5$  – момент времени, в который появляется символ  $a$  (импульс) следующего кодового цикла.

Очевидно, что временное слово для цикла кода  $Z$  содержит на два элемента больше и имеет следующий вид:

$$(a, \tau_1) \rightarrow (b, \tau_2) \rightarrow (a, \tau_3) \rightarrow (b, \tau_4) \rightarrow (a, \tau_5) \rightarrow (b, \tau_6) \rightarrow \dots$$

Временные соотношения для кода  $Z$  имеет вид:

$$\begin{array}{lll} \tau_2 = \tau_1 + 0,35; & \tau_3 = \tau_2 + 0,12; & \tau_4 = \tau_3 + 0,22; \\ \tau_5 = \tau_4 + 0,12; & \tau_6 = \tau_5 + 0,22; & \tau_7 = \tau_6 + 0,57, \end{array}$$

где  $\tau_7$  – момент времени, в который появляется символ  $a$  (импульс) следующего кодового цикла.

Формально числовые коды трансмиттера КПТ-5 представляются временными регулярными языками:

$$A_{\text{КЖ}} = \left\{ \left( (abab)^{\omega}, \tau \right) \mid \forall i \geq 1 \left( \tau_{4i-2} = \tau_{4i-3} + 0,23 \right) \wedge \left( \tau_{4i-1} = \tau_{4i-2} + 0,57 \right) \wedge \left( \tau_{4i} = \tau_{4i-1} + 0,23 \right) \wedge \left( \tau_{4i+1} = \tau_{4i} + 0,57 \right) \right\}; \quad (1)$$

$$A_{\text{Ж}} = \left\{ \left( (abab)^{\omega}, \tau \right) \mid \forall i \geq 1 \left( \tau_{4i-2} = \tau_{4i-3} + 0,38 \right) \wedge \left( \tau_{4i-1} = \tau_{4i-2} + 0,12 \right) \wedge \left( \tau_{4i} = \tau_{4i-1} + 0,38 \right) \wedge \left( \tau_{4i+1} = \tau_{4i} + 0,72 \right) \right\}; \quad (2)$$

$$A_3 = \left\{ \left( (ababab)^{\omega}, \tau \right) \mid \forall i \geq 1 \left( \tau_{6i-4} = \tau_{6i-5} + 0,35 \right) \wedge \left( \tau_{6i-3} = \tau_{6i-4} + 0,12 \right) \wedge \left( \tau_{6i-2} = \tau_{6i-3} + 0,22 \right) \wedge \left( \tau_{6i-1} = \tau_{6i-2} + 0,12 \right) \wedge \left( \tau_{6i} = \tau_{6i-1} + 0,22 \right) \wedge \left( \tau_{6i+1} = \tau_{6i} + 0,57 \right) \right\}. \quad (3)$$

Рассмотрим временные автоматы, порождающие временные регулярные языки (1) – (3) и позволяющие построить соответствующие алгоритмы генерации и дешифрации, на примере числового кода Ж. На рисунке 4 приведен граф временного автомата, порождающего временной регулярный язык (2).

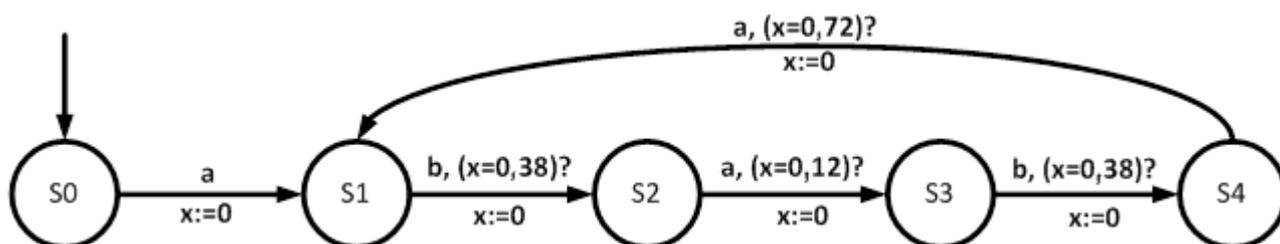


Рисунок 4 – Граф временного автомата числового кода Ж

Приведенный на рисунке 4 граф временного автомата числового кода Ж позволяет легко построить генерирующий алгоритм. Следует лишь обеспечить регулярное, равномерное, привязанное к реальному времени приращение значения переменной  $x$ . В качестве условий выполнения переходов следует принять только временные ограничения на значения этой переменной, а алфавит  $\Sigma$  следует считать выходным с соответствующей интерпретацией его букв.

Для построения алгоритма дешифрации числового кода Ж граф на рисунке 4 должен быть доопределен: следует определить действия временного автомата при наличии на его входе временного слова, не соответствующего числовому коду Ж. Приемлемым поведением временного автомата в этом случае является его переход в начальное состояние – сброс. Также не принципиальным, но целесообразным представляется переопределить семантику входного алфавита  $\Sigma$  следующим образом: символ  $a$  соответствует высокому уровню входного сигнала автомата, символ  $b$  – низкому. Это позволит исключить необходимость предварительного детектирования изменения значения входного сигнала без значительного усложнения графа временного автомата. На рисунке 5 приведен граф временного автомата дешифрации числового кода Ж, полученный из исходного путем доопределения.

Наиболее просто успешная дешифрация кода по графу на рисунке 5 описывается с помощью временного автомата Мюллера, в котором множество допускающих семейств состояний  $F = \{ \{S1, S2, S3, S4\} \}$  содержит всего одно семейство, состоящее из всех состояний кроме начального. Действительно, из графа на рисунке 5 следует, что если входное временное слово соответствует числовому коду Ж, то временной автомат совершает только перехо-

ды вида  $S1 \rightarrow S2 \rightarrow S3 \rightarrow S4$ . Признаком успешной дешифрации очередного цикла кодового сигнала является переход временного автомата из состояния  $S4$  в состояние  $S1$ .

Аналогично строятся графы временных автоматов для генерации и дешифрации числовых кодов КЖ и З, а также рассуждения относительно их допускающих семейств состояний. Очевидно, что графы временных автоматов кода З имеют на два состояния больше по сравнению с приведенными на рисунках 4 и 5.

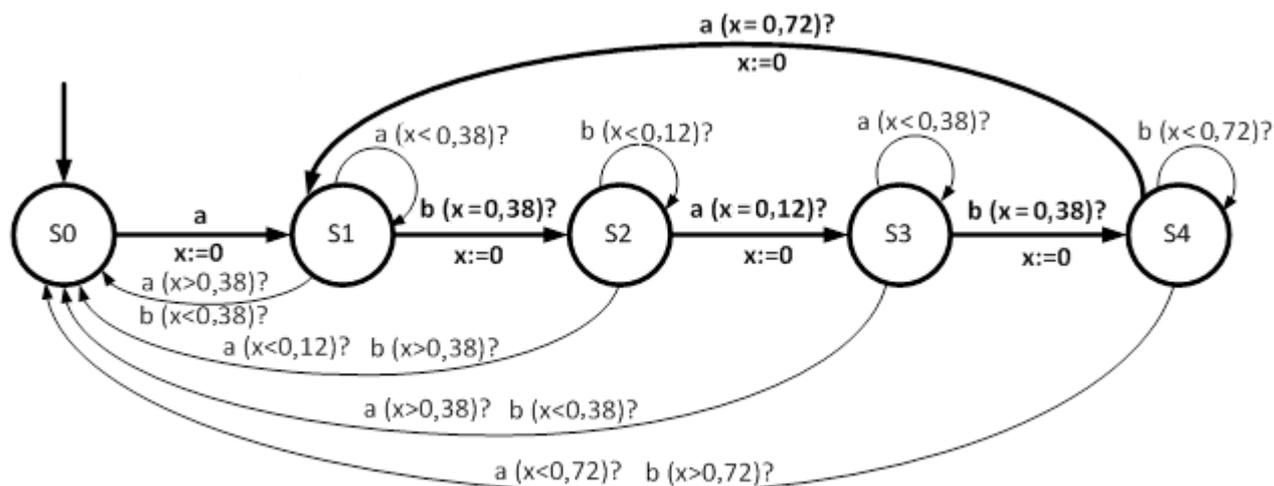


Рисунок 5 – Граф временного автомата дешифрации числового кода Ж

Предложенное формальное представление числовых кодов позволяет применить для программной реализации алгоритмов их генерации и дешифрации метод непосредственного представления таблиц переходов, описанный, например, в источнике [11]. Реализация алгоритмов выполнена на языке программирования С в интегрированной среде разработки Atmel® Studio, которая является бесплатной и свободно распространяемой. Запуск разработанных программ позволил осуществить имитацию работы однопутной числовой автоблокировки. Таким образом, подтверждены корректность предложенного математического представления числовых кодов и работоспособность разработанных макетов.

По предварительным оценкам изучение вопросов генерации числовых кодов средствами микропроцессорных систем потребует не менее четырех академических часов лекций и не менее четырех академических часов лабораторных работ. Дешифрация числового кода является более сложным процессом по сравнению с генерацией. Затраты времени на изучение дешифрации числового кода составят не менее шести академических часов лекций и не менее восьми академических часов лабораторных работ.

При разработке тестовых алгоритмов потребовались тщательный анализ специальной литературы в области релейных и микропроцессорных СИРДП, базовые навыки разработки и отладки программного обеспечения, знание базовых принципов построения микропроцессорных систем, навыки применения основных теоретических положений электротехники, электроники, теории конечных автоматов. Все указанные знания и навыки могут быть сформированы у студентов с помощью лекционного и практического курса, построенного на основе разрабатываемых авторами оборудования и методики.

### Список литературы

1. Theeg G. Railway signalling & interlocking: international compendium / G. Theeg, E. Anders, S. Vlasenko. Eurailpress, 2009.
2. Виноградова, В. Перегонные системы автоматики [Текст] / В. Виноградова / УМЦ ЖДТ. – М., 2005. – 292 с.
3. Казаков, А. А. Автоблокировка, локомотивная сигнализация и автостопы: Учебник [Текст] / А. А. Казаков, Е. А. Казаков. – М.: Транспорт, 1980. – 360 с.

4. Кравцов, Ю. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута. – М.: Транспорт, 1996. – 400 с.
5. Евстифеев, А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega: Руководство пользователя / А. В. Евстифеев. М.: Додэка-XXI, 2007. – 560 с.
6. Banzi, M. Getting started with Arduino / M. Banzi. O'Reilly Media, Inc., 2011.
7. Fischl, T. USBasp-USB programmer for Atmel AVR controllers / T. Fischl. 2011.
8. Карпов, Ю. Г. Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем [Текст] / Ю. Г. Карпов. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
9. Alur, R. A theory of timed automata. Theor. Comput. Sci. // R. Alur, D. L. Dill. – 1994, vol. 126, № 2, P. 183 – 235.
10. Bengtsson, J. Timed Automata: Semantics, Algorithms and Tools in Lectures on Concurrency and Petri Nets. Advances in Petri Nets. // J. Bengtsson, W. Yi / Springer Berlin Heidelberg, 2004. – P. 87 – 124.
11. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников и др. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.

## References

1. Theeg G., Anders E., Vlasenko S. Railway signalling & interlocking: international compendium – Eurailpress, 2009.
2. Vinogradova V., *Peregonnnye sistemy avtomatiki* (Automatic systems for railway lines). Moscow, 2005, 292 p.
3. Kazakov A. A., Kazakov E. A. *Avtoblokirovka, lokomotivnaya signalizaciya i avtostopy: uchebnik dlya tekhnikov zh.-d. transporta* (Automatic interlocking, locomotive signaling, and automatic brakes). Moscow: Transport, 1980, 360 p.
4. Kravtsov Y. A., Nesterov V. L., Lekuta G. F. *Sistemy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki* (Railway automation and remote control systems). Moscow: Transport, 1996, 400 p.
5. Evstifeev A. V. *Mikrokontrollery AVR semejstva Mega. Rukovodstvo polzovatelya* (AVR Mega microcontroller family. User guide) – Moscow: Dodeka-XXI, 2007, 560 p.
6. Banzi M. Getting started with Arduino. O'Reilly Media, Inc., 2011.
7. Fischl T. USBasp-USB programmer for Atmel AVR controllers, 2011.
8. Karpov Y.G., *Verifikaciya parallelnykh i raspredeleennykh programnykh sistem* (MODEL CHECKING. Verification of parallel and distributed software systems). Saint-Petersburg, 2010, 560 p.
9. Alur R., Dill D. L. A theory of timed automata. Theor. Comput. Sci., 1994, vol. 126, no. 2, pp. 183 – 235.
10. Bengtsson J., Yi W. Timed Automata: Semantics, Algorithms and Tools in Lectures on Concurrency and Petri Nets. Advances in Petri Nets., Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 87 – 124.
11. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Hristov H. A., Gavzov D. V *Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki* (Engineering techniques for safety-critical microelectronic railway automation systems). Moscow: Transport, 1995, 272 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Борисенко Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: borisenkovd@omgups.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Signalling and Interlocking», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-72.

E-mail: borisenkovd@omgups.ru

## Осин Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

E-mail: osin\_victor@mail.ru

## Osin Viktor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Graduate student of the department «Signalling and Interlocking», OSTU.

E-mail: osin\_victor@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Борисенко, Д. В. Практический подход к изучению микропроцессорных систем интервального регулирования движения поездов [Текст] / Д. В. Борисенко, В. А. Осин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – 1 (29). – С. 90 – 99.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Borisenko D. V., Osin V.A. Teaching and learning microprocessor block signalling systems by practice. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 90 – 99 (In Russian).

УДК 621.316.97

## В. А. Кандаев, М. А. Леденев, А. В. Пономарев

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

### ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПАНОРАМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ПУСТОТЕЛЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ И АНАЛИЗА РАСПОЗНАННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

*Аннотация.* В настоящее время отсутствует эффективное решение по оценке коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, не требующее откопки опоры. Данная проблема делает актуальной задачу по разработке программно-аппаратного комплекса определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети. Авторами данной статьи сформирован программный модуль, позволяющий реализовать панорамную съемку внутренней поверхности подземной части опоры, повысить качество полученных изображений, провести поиск неоднородностей и определить их геометрические параметры, а также выполнить анализ обнаруженных неоднородностей. Внедрение результатов проведенной работы позволит снизить временные и трудовые затраты и повысить эффективность диагностических работ на опорах контактной сети.

*Ключевые слова:* коррозия, опора контактной сети, блуждающие токи, диагностика, техническое состояние, компьютерное зрение, программный модуль, панорама, внутренняя поверхность.

## Vasiliy A. Kandaev, Maxim A. Ledenev, Anton V. Ponomarev

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

### THE SOFTWARE MODULE OF FORMATION OF THE PANORAMIC IMAGE OF AN INTERNAL SURFACE OF AN UNDERGROUND PART OF HOLLOW REINFORCED CONCRETE SUPPORT OF CONTACT NETWORK AND THE ANALYSIS OF THE RECOGNIZABLE INHOMOGENEITIES

*Abstract.* Now there is no efficient decision to estimate a corrosion condition of an underground part of reinforced concrete support of contact network which is not demanding digging of a support. This problem makes actual a task of development of a hardware and software system of definition of a corrosion condition of an underground part of reinforced concrete support of contact network. As a result of work the software module allowing to realize panoramic shooting of an internal surface of an underground part of a support, to increase quality of the received images, to carry out searching of inhomogeneities and to determine their geometrical parameters, and also to make the analysis of the

*found inhomogeneities. Implementation of results of work will allow to reduce time and labor costs, and also to increase efficiency of diagnostic works on support of contact network.*

**Keywords:** *corrosion, support of contact network, ground currents, diagnostics, technical condition, computer vision, software module, panorama, internal surface.*

В настоящее время в компании ОАО «Российские железные дороги» находится в эксплуатации около 1,5 млн разнотипных железобетонных опор контактной сети с различным сроком эксплуатации. Для этих опор характерны коррозионные повреждения металлической арматуры подземной части в зоне переменной влажности и максимального приложенного механического момента, приводящие к потере несущей способности. Выход из строя опоры контактной сети приводит к существенным материальным затратам и может повлечь за собой несчастные случаи. Основными источниками коррозионных разрушений являются токи, стекающие с арматуры вследствие неисправности изолирующих элементов опоры [1].

Оценка коррозионного состояния железобетонных опор контактной сети является сложной задачей, потому что основная часть дефектов имеет скрытый характер, а сложное физико-химическое взаимодействие арматуры и бетона требует комплексного подхода к данной проблеме [2]. Сложности возникают при обследовании поверхности бетона и арматуры в подземной части опоры, так как в настоящее время отсутствует эффективное решение по определению коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети, не требующее откопки опоры.

В настоящее время для диагностики состояния железобетонных опор контактной сети применяются различные методы (потенциальных диаграмм, вибрационный, электрохимический, ультразвуковой). Множество методов требует организации доступа к обследуемой поверхности, вследствие чего диагностику состояния подземной части опор без откопки выполнить практически невозможно; результаты данных методов существенно зависят как от параметров грунта, в котором установлена опора, так и от состояния самой опоры [3]. Методы, позволяющие определять состояние опоры без откопки (например, классическая версия визуального метода, определяющая состояние опоры по коррозионным повреждениям на надземной поверхности опоры), как правило, не дают достаточной точности обследования.

Методы оценки технического состояния железобетонных опор контактной сети, рекомендованные действующей нормативно-технической документацией, не позволяют определять состояние подземной части опор контактной сети. Данная проблема делает актуальной задачу по разработке программно-аппаратного комплекса определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети.

Для выполнения поставленной задачи авторами статьи разработаны модули программно-аппаратного комплекса, позволяющие выполнить контурный анализ изображений [4] и повысить качество изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности [5]. Программное обеспечение реализовано на языке C/C++ с подключением библиотеки компьютерного зрения OpenCV, которая содержит алгоритмы компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом.

Разработанные ранее программные модули переработаны, дополнены функцией объединения полученных изображений в панорамное. В результате сформирован программный модуль, позволяющий реализовать панорамную съемку внутренней поверхности подземной части опоры, повысить качество полученных изображений, провести поиск неоднородностей и определить их геометрические параметры, а также проанализировать полученную в результате обработки информацию о найденных неоднородностях.

Блок-схема программного модуля представлена на рисунке 1.

В процессе работы программного модуля обеспечивается формирование панорамного изображения внутренней поверхности опоры с помощью панорамной видеоэндоскопической системы, которая обеспечивает возможность создавать 360-градусную панораму внутренней поверхности опоры, что позволяет в итоге получить изображение требуемого качества, а

также снизить продолжительность обследования опоры и упростить конструкцию видеосистемы, так как отпадает необходимость поворотов в фундаментальной плоскости.

Формирование панорамного изображения осуществляется по фотоснимкам с шести камер, расположенных на одной высоте под углом  $60^\circ$  друг к другу в азимутальной плоскости. Угол обзора каждой камеры составляет  $75^\circ$ , что обеспечивает порядка  $20^\circ$  перекрытия изображений соседних камер (рисунок 2), данное условие позволяет собрать из шести снимков одно панорамное изображение (рисунок 3). Если перекрытие будет меньше или больше указанной величины  $20^\circ$ , то система обработки изображений может не справиться со сборкой панорамы в автоматическом режиме. Поэтому характеристики камер и их расположение играют важную роль в формировании панорамы.

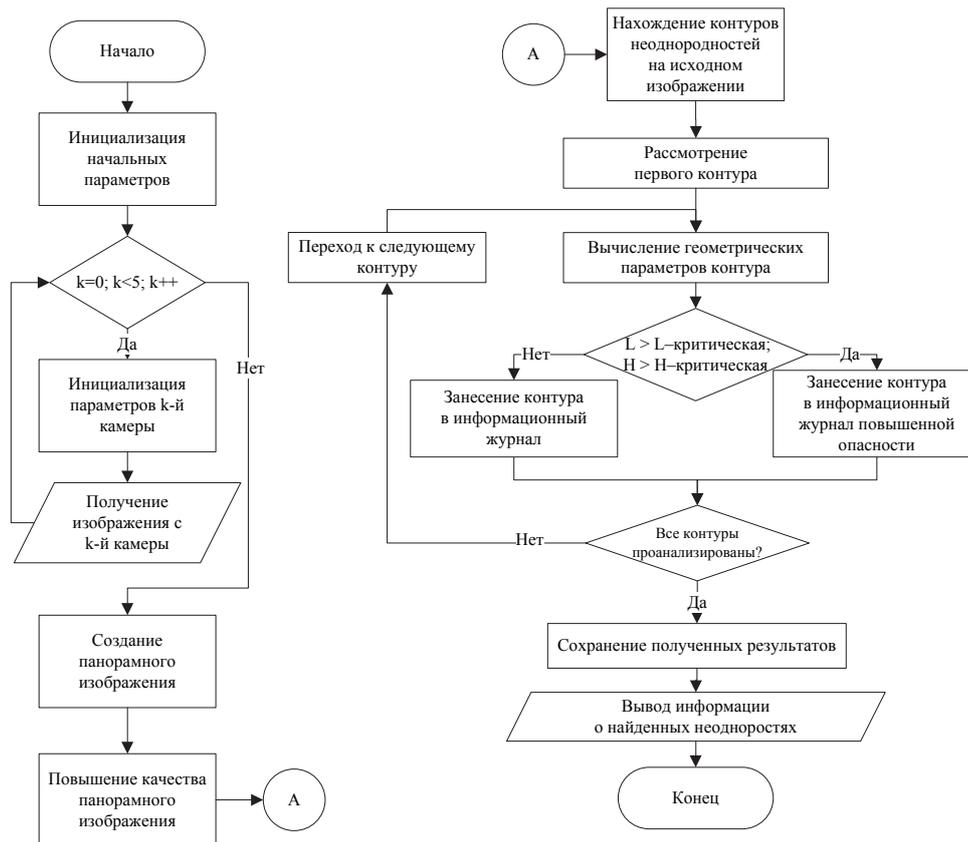


Рисунок 1 – Блок-схема программного модуля

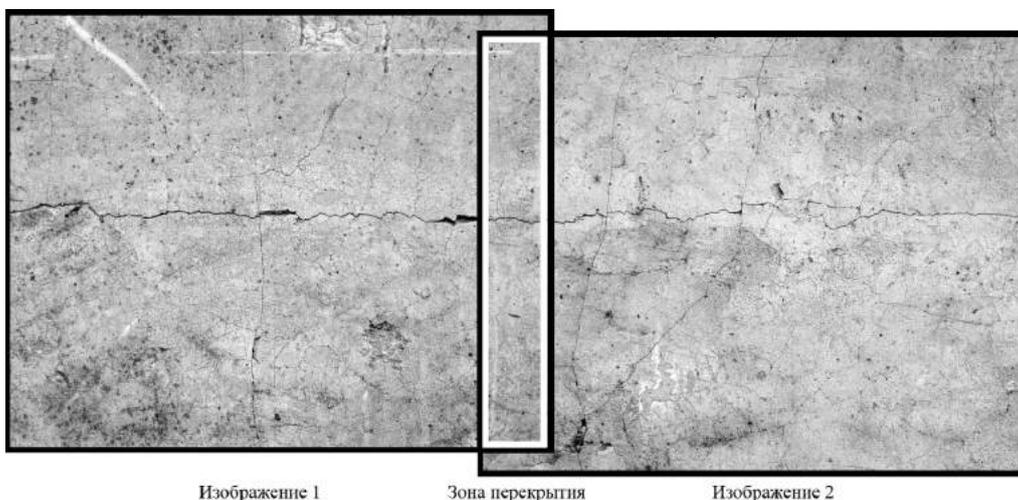


Рисунок 2 – Пример перекрытия двух изображений

После получения панорамного изображения наступает этап улучшения качества изображения за счет повышения контрастности путем выравнивания гистограммы. Под выравниванием понимается повышение качества визуального восприятия, т. е. проведение таких преобразований, чтобы на изображении в равных количествах присутствовали пиксели с различными значениями яркости из заданного динамического диапазона интенсивностей, делая изображение качественным и информативным. В результате выравнивания гистограммы в большинстве случаев существенно расширяется динамический диапазон, что позволяет отобразить ранее не замеченные фрагменты [6].



Рисунок 3 – Пример части панорамного изображения

Заключительный этап работы программного модуля – контурный поиск, вычисление геометрических параметров и анализ параметров обнаруженных неоднородностей.

Поиск контуров неоднородностей заключается в получении множества непроектируемых элементов, которые используются для описания границ, полученных по схеме цепного кодирования, предложенной Фрименом [7]. На двумерное изображение накладывается прямоугольная сетка, и узлы сетки, которые наиболее близки к точкам изображения, соединяют отрезками прямых. Каждому такому отрезку в соответствии с наклоном присваивают восьмеричное число. Таким образом, изображение представляется цепью (последовательностью) или цепями восьмеричных чисел, кодов.

Вычисление геометрических параметров неоднородностей (длина, ширина, площадь) реализовано с помощью функции *Open CV: arcLength, boundingRect, contourArea*. Пример функции, позволяющей рассчитать длину контура: *double arcLength(InputArray curve, bool closed)*. *Curve* – вектор, содержащий начальную и конечную точки контура, а *closed* – метка, указывающая закрытый контур или нет.

Анализ геометрических параметров обнаруженных неоднородностей происходит путем сопоставления полученных результатов с предельно допустимыми размерами повреждений, приведенными в действующей нормативно-технической документации, после проанализированная информация заносится в тот или иной информационный журнал дефектов.

В настоящее время изготовлен макетный образец программно-аппаратного комплекса [8], который содержит панорамную видеоскопическую систему, систему освещения, систему управления эндоскопом, персональный компьютер с программным обеспечением, блок питания.

Система освещения с блоком управления плавной регулировкой яркости обеспечивает возможность изменения уровня освещенности внутренней поверхности опоры, что позволяет получить изображение требуемого качества.

Система управления эндоскопом дает возможность поворота видеоскопа в двух взаимоперпендикулярных плоскостях, что позволяет изменять направление наблюдения та-

ким образом, чтобы обследовать внутреннюю поверхность опоры от поверхности грунта до основания опоры.

Определение коррозионного состояния внутренней подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и линий электропередач осуществляется следующим образом. Через вентиляционное отверстие опоры во внутреннюю полость опоры помещают панорамную видеоэндоскопическую систему, с помощью системы освещения обеспечивается необходимый уровень освещенности внутренней поверхности опоры, с помощью системы управления эндоскопом перемещают его таким образом, чтобы обследовать всю внутреннюю поверхность опоры от поверхности грунта до основания опоры и определить место расположения коррозионного повреждения. Полученная информация анализируется программным обеспечением для автоматического выявления коррозионных повреждений и определения их геометрических параметров. На основании действующей нормативно-технической документации, по наличию и размеру выявленных коррозионных повреждений, а именно трещин и бурых пятен на внутренней поверхности опоры, судят о коррозионном состоянии подземной части пустотелой железобетонной опоры.

Применение результатов проведенной авторами статьи работы позволит повысить достоверность выполняемых обследований опор контактной сети, снизить временные и трудовые затраты по сравнению с методами, рекомендованными действующей нормативно-технической документацией. Наиболее важными параметрами, характеризующими эффективность и конкурентоспособность данной работы, являются отсутствие необходимости откопки подземной части, малогабаритность и мобильность оборудования.

### *Список литературы*

1. Леденев, М. А. Автоматизированная система выявления повреждений в подземной части железобетонных опор контактной сети и линий электропередач без откопки [Текст] / М. А. Леденев, А. В. Пономарев // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 226 – 230.
2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.
3. Подольский, В. И. Железобетонные опоры контактной сети конструкция, эксплуатация, диагностика [Текст] / В. И. Подольский. – М.: Интекст, 2007. – 152 с.
4. Леденев, М. А. Программный модуль первичной обработки изображений, полученных в условиях ограниченного объема [Текст] / М. А. Леденев, А. В. Пономарев // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 223 – 228.
5. Кандаев, В. А. Программный модуль определения качества изображений в задачах распознавания [Текст] / В. А. Кандаев, А. В. Пономарев, М. А. Леденев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 237 – 248.
6. Кандаев, В. А. Программное повышение качества изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности [Текст] / В. А. Кандаев, А. В. Пономарев, М. А. Леденев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – Хабаровск. – 2015. – № 2 (4). – С. 35 – 38.
7. Фу, К. Структурные методы в распознавании образов [Текст] / К. Фу. – М.: Мир, 1977. – 319 с.
8. Пат. № 166010 Российская Федерация, МПК G01N 21/88. Устройство для определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор линий электропередач и контактной сети [Текст] / В. А. Кандаев, М. А. Леденев, К. В. Авдеева, А. В. Пономарев; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2016118504/28; заявл. 27.04.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.

## References

1. Ledenev M.A., Ponomarev A.V. Automated system for detection of damages in the underground part of ferroconcrete pillars of contact network and power lines without excavation [Avtomatizirovannaja sistema vyjavlenija povrezhdenij v podzemnoj chasti zhelezobetonnyh opor kontaktnoj seti i linij jelektroperedach bez otkopki]. Pribory i metody izmerenij, kontrolja kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte: Materialy vtoroj vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii s mezhdunarjdnom uchastiem – *Devices and methods of measurements, quality control and diagnostics in the industry and on transport: Materials of the second All-Russian scientific and technical conference with international participation*, 2016, pp. 226 – 230.
2. Kotelnikov A.V., Kandaev V.A. Vagabond currents and operational monitoring of a corrosion condition of underground constructions of systems of power supply of railway transport [Bluzhdajushhie toki i jekspluatacionnyj kontrol' korrozionnogo sostojanija podzemnyh sooruzhenij sistem jelektrosnabzhenija zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow: The educational and methodical center by training on railway transport, 2014, 552 p.
3. Podol'skij V.I. Reinforced concrete support of contact network design, operation, diagnostics [Zhelezobetonnye opory kontaktnoj seti konstrukcija, jekspluatacija, diagnostika]. Moscow: Intekst, 2007, 152 p.
4. Ledenev M.A., Ponomarev A.V. A software module initial processing of images obtained under conditions in a limited volume [Programmnyj modul' pervichnoj obrabotki izobrazhenij, poluchennyh v uslovijah ogranichenogo obema]. Povyshenie jenergeticheskoj jeffektivnosti nazemnyh transportnyh sistem: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii – *Increase in power effectiveness of land transport systems: Materials of the international scientific and practical conference*, 2014, pp 223 – 228.
5. Kandaev V.A., Ponomarev A.V., Ledenev M.A. A software module of image quality defining for pattern recognition tasks [Programmnyj modul' opredelenija kachestva izobrazhenij v zadachah raspoznavanija]. Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoj konferencii – *Innovative projects and technologies in education, the industry and on transport: Materials of a scientific conference*, 2015, pp. 237 – 248.
6. Kandaev V.A., Ponomarev A.V., Ledenev M.A. Software quality improvement of images, obtained in low light conditions [Programmnoe povyshenie kachestva izobrazhenij, poluchennyh v uslovijah nedostatochnoj osveshhjonnosti]. Transport aziatsko-tihookeanskogo regiona – *Pacific Rim transport*, 2015, pp. 35 – 38.
7. Fu K. Structural methods in a pattern recognition [Strukturnye metody v raspoznavanii obrazov]. Moscow: world, 1977, p 319.
8. Kandaev V.A., Ledenev M.A., Avdeeva K.V., Ponomarev A.V. Patent RU 166010 G01N 21/88, 10.11.2016.

### 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.

#### Леденев Максим Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 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.

#### Ledenev Maxim Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94/

E-mail: l.m.aleksandrovich@mail.ru

## Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 31-06-88.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кандаев, В. А. Программный модуль формирования панорамного изображения внутренней поверхности подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и анализа распознанных неоднородностей [Текст] / В. А. Кандаев, М. А. Леденев, А. В. Пономарев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 99 – 105.

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Post-graduate student of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: l.m.aleksandrovich@mail.ru

## Ponomarev Anton Vitalievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kandaev V.A., Ledenev M.A., Ponomarev A.V. The software module of formation of the panoramic image of an internal surface of an underground part of hollow reinforced concrete support of contact network and the analysis of the recognizable inhomogeneities. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 99 – 105 (In Russian).

УДК 624.04: 624.5

## А. С. Дороган

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

## РЕТРОСПЕКТИВА ВАНТОВО-ВИСЯЧИХ МОСТОВ ПОВЫШЕННОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

**Аннотация.** Показано возросшее влияние вантово-висячих мостов (ВВМ) для перекрытия морских проливов. Дана ретроспектива больших балочно-комбинированных и вантово-висячих мостов. Приведена перспектива больших балочно-комбинированных мостов. Рассмотрены различные схемы вантово-висячих мостов с прямолинейными «вантами». Предлагаются две новые схемы вантово-висячих мостов с криволинейными вантами, которые можно использовать для мостового перехода с материка на о. Сахалин через пролив Невельского.

**Ключевые слова:** висячий мост, вантовый мост, вантово-висячий мост.

## Alexander S. Dorogan

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

## CABLE-STAYED SUSPENSION BRIDGES WITH HIGH AERODYNAMIC STABILITY

**Abstract:** The increased influence of cable-stayed - suspension bridges for crossing of sea passages is shown. The retrospective show of their development is given. The prospect of the big beam - combined bridges is resulted. Various schemes of vantovo-suspension bridges with rectilinear cables are considered. Two new schemes of cable-stayed suspension bridges with curvilinear cables are offered.

**Keywords:** suspension bridge, cable-stayed bridge, cable-stayed suspension bridge.

## Ретроспектива больших балочно-комбинированных мостов.

Висячий мост «Akashi Kaikyo» с о. Хонсю через пролив на о. Сикоку имеет рекордный пролет – 1991 м (Япония, 1998 г.).

На втором месте – висячий мост «Xihoumen», построенный на большом архипелаге Zhoushan с пролетом 1650 м (Китай, 2009 г.), где балка жесткости с продольным «окном».

На четвертом – висячий мост «Yi Sun-sin» в Гванжу с пролетом 1545 м (Корея, 2013 г.).

Вантовый мост с мыса Назимова (Владивосток) через пролив Босфор Восточный на о. Русский имеет рекордный пролет  $L_0 = 1104$  м (полная длина – 1885 м).

Второй вантовый мост «Сучьжоу» через р. Янцзы имеет меньший пролет – 1088 м (Китай, 2008 г.), третий вантовый мост «Камнерезов» в Гонконге – 1018 м (2009 г.).

Для балочно-вантового моста предельный пролет  $L_n = 1400$  м установлен из условия прочности стальной или сталежелезобетонной балки на сжатие.

## Ретроспектива вантово-висячих мостов.

Впервые вантово-висячий мост был построен через р. Ниагару в 1855 г.,  $L_0 = 250$  м; вантами поддерживались  $0,25 L_0$ ; имел два яруса проезда: под железную дорогу и экипажи [1].

Удачно построен американский мост по схеме  $182 + 322 + 182$  м через р. Огио в Цинциннати (1867 г.).

Распорный вантово-висячий мост «Brooklyn» в Нью-Йорке построен по схеме  $287 + 487 + 287$  м (1883 г.), впервые здесь применены фермы жесткости.

Мост «de Lamothe» на р. Allier,  $L_0 = 113$  м (Франция, 1883 г.); кабель работает только на среднем участке длиной 95 м; крайние ванты поставлены под углом  $45^\circ$  (рисунок 1).

Мост «Vernaison» через р. Рону построен по схеме  $52,5 + 233 + 42,4$  м (1903 г.); на длине 28 м от каждого пилона пролеты поддерживаются вантами. Сборка пролетного строения проведена без подмостей (рисунок 2).

Мост через р. Blavet близ Гавра построен по схеме  $37 + 163 + 37$  м (1904 г.); кабелем поддерживается только средний участок длиной 91 м (рисунок 3).

Мост «Jons-Nievro» через р. Рону,  $L_0 = 200$  м (1905 г.).

Действующий автодорожный мост «Trellins»,  $L_0 = 146$  м (Франция, Альпы, 1906 г.).

Действующий автодорожный мост «Sidi M'Cid»,  $L_0 = 160$  м (Алжир, Constantine, 1912 г.).

В марте 2016 г. закончен монтаж распорного вантово-висячего моста через Босфор длиной 1,4 км. Здесь использовали демпферы для вант и подвесок.

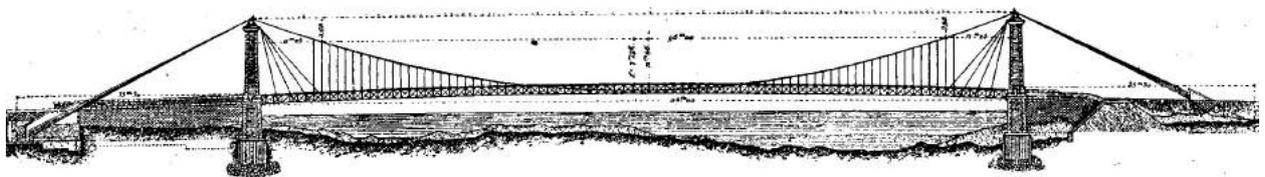


Рисунок 1 – Вантово-висячий мост «de Lamothe» через р. Allier,  $L_0 = 113$  м (1883 г.)



Рисунок 2 – Вантово-висячий мост «Vernaison» через р. Рону, построенный по схеме  $52,5 + 233 + 42,4$  м (1903 г.)

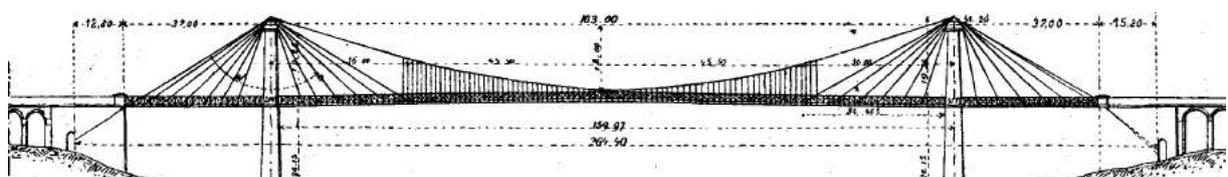


Рисунок 3 – Вантово-висячий мост через р. Blavet близ Гавра, построенный по схеме  $37 + 163 + 37$  м (1904 г.)

*Перспектива большепролетных балочно-комбинированных мостов.*

Планируется строительство железнодорожного мостового перехода с материка на о. Сахалин через пролив Невельского в новом створе южнее мыса Лазарева шириной 12,5 км.

В Японии разработаны проекты гигантских мостов на внутренних и внешних путях сообщения.

Проект мостового перехода с о. Хоккайдо на о. Сахалин через пролив Лаперуза (в створе мыс Соя – мыс Крильон) шириной 40 км с глубинами до 50 м.

Проект мостового перехода через пролив Цугару (Сангарский) между о. Хонсю и о. Хоккайдо. Рядом проходит построенный подводный тоннель Сейкан.

В новом створе ширина перехода 19 км, а наибольшая глубина достигает 270 м.

Для перекрытия международного судового хода предполагается перекрыть его двумя вантово-висячими (гибридными) пролетными строениями с  $L_0 = 4000$  м, а подходы – висячими пролетными строениями с  $L_0 = 2000$  м.

Перспективным является переход с Порт-Артура (Китай) через Чжилинский пролив до полуострова Шаньдун в створе Дэнчжоу для скоростной железной дороги общей протяженностью 114 км. Проходит по дуге через цепь островков четырьмя участками: 45 + 21 + 28 + 20 км.

Проект мостового перехода с полуострова Лейзхоа на материке (юг Китая) через пролив Qiongzhou на о. Хайнань. Планируется многопролетный висячий мост длиной 26,3 км, наибольший пролет  $L_0 = 3000$  м.

Похожий проект мостового перехода разработан для пересечения Зондского пролива с о. Суматра на о. Ява (Индонезия). Планируется висячий мост длиной 27 км и наибольший пролет около 3000 м.

*Вантово-висячие мосты с прямолинейными вантами.*

В конце XX – начале XXI в. происходит бум строительства «морских» мостов, пересекающих морские проливы и бухты. Морские мосты значительно отличаются от обычных большепролетных мостов:

- имеют фундаменты на значительной глубине;
- учитывают области слабых грунтов (илов);
- расположены обычно в местах действия сильных тайфунов и подводных течений;
- имеют пролеты, достаточные для безопасной подмостовой навигации судов.

Поэтому главная задача при проектировании морских мостов – это увеличение длины пролетов и снижение высоты пилонов, что уменьшит стоимость этих мостов.

Классические висячие мосты (ВМ) при больших пролетах имеют невысокую изгибную вертикальную и крутильную жесткость пролетных строений и, как следствие, – слабую общую аэродинамическую устойчивость. Для распорных ВМ требуется сооружение объемных и дорогих анкерных массивов (АМ).

Вантово-балочные мосты лишены этих недостатков, но длина их пролетов и высота пилонов ограничены, велик также риск их монтажа длинными консолями.

Вантово-висячие мосты (ВВМ) являются комбинацией вантового и висячего мостов. ВВМ объединяют в себе преимущества вантовых и висячих мостов и исключают их недостатки, обеспечивая возможность перекрывать большие морские проливы. Эти мосты демонстрируют достаточно высокую изгибную жесткость и хорошие технико-экономические показатели.

Несмотря на это ВВМ не нашли широкого применения из-за прерывистой конфигурации несущих конструкций и сложного механического поведения. Как следствие, ВВМ не получили дальнейшего развития за последние десятилетия.

Известны висячие мосты, усиленные вантами, которые относятся к системам повышенной жесткости (СПЖ), это «смешанные» ВВМ:

применение наклонных нисходящих вантов на участках вблизи пилонов (рисунок 4, а) [2]; благодаря этому балка жесткости (БЖ) как бы получает дополнительные упругие опоры

вблизи точек наибольших перемещений; на таких участках узлы БЖ поддерживаются одновременно подвесками и вантами; предварительное натяжение такой СПЖ сложнее; изгибная жесткость системы несколько увеличивается; это Бруклинский мост и старый мост через Ниагару;

отдельные проекты восходящих вантов, которые фиксируют очертание кабеля, что увеличивает жесткость ВМ (рисунок 4, в).

Известны ВВМ, когда различные участки БЖ поддерживаются отдельно подвесками и отдельно вантами (рисунок 4, б), это «локальные» ВВМ.

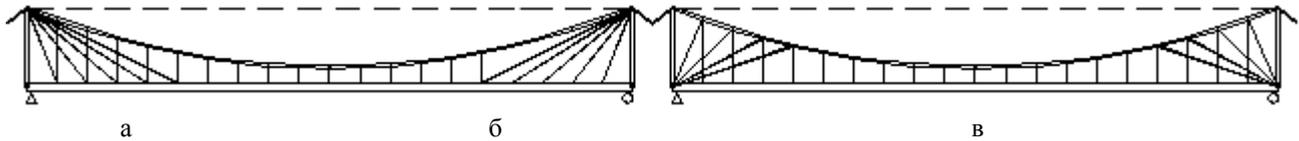


Рисунок 4 – Схемы разновидностей вантово-висячих мостов

Это старые мосты «de Lamothe» и «Vernaison» через р. Рону.

В практике проектирования и мостостроения известны такие вантово-висячие мосты.

*Внешне распорные вантово-висячие мосты; earth-anchored suspension bridges with cable-stays (EA-SBCS).* Их называют еще комбинированными системами Дишингера («Dischinger type»). Кабель закрепляется на анкерные массивы; балка жесткости на всей ее длине свободна от продольных сил (рисунок 5).

*Висячая часть* БЖ поддерживается подвесками криволинейного кабеля и находится в состоянии чистого изгиба [3]. *Вантовая часть* БЖ подвешена вантами, создающими в балке продольные силы. Вантовая и висячая части не оказывают влияния друг на друга, поэтому они могут моделироваться как независимые конструкции.

Разработаны проекты гигантских распорных ВВМ с  $L_0 = 2500 - 3000$  м через морские проливы.

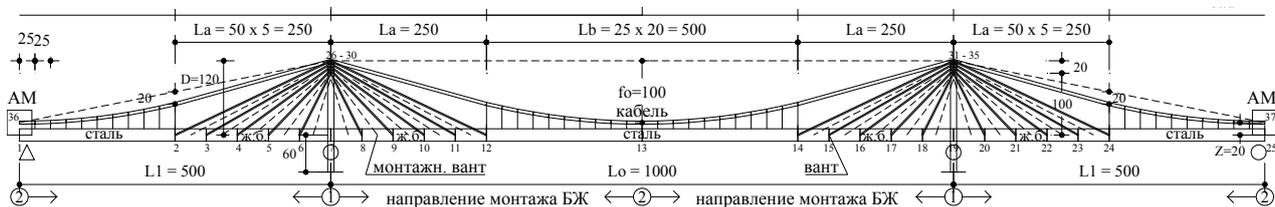


Рисунок 5 – Схема распорного вантово-висячего моста

*Безраспорные вантово-висячие мосты; self-anchored cable-stayed suspension bridges (SA-CSSB).* Это новый тип ВВМ, созданный из объединения идеи безраспорных висячих и вантовых мостов. Он имеет следующие преимущества: достаточно высокую изгибную жесткость и хорошую аэродинамическую устойчивость, уменьшение стоимости, применимость для просадочных оснований.

Кабель закрепляется на концах БЖ, которая воспринимает горизонтальный распор кабеля (рисунок 6).

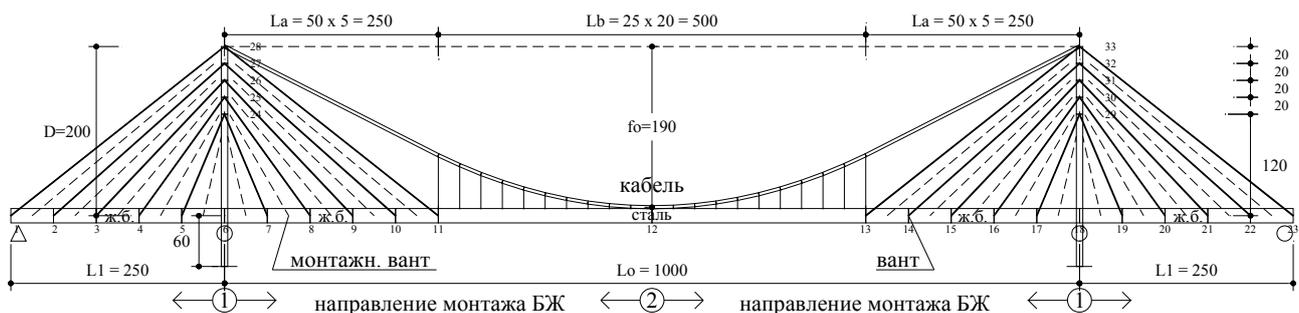


Рисунок 6 – Схема безраспорного вантово-висячего моста

Здесь вантовая и висячая части БЖ действуют как сжато-изогнутые элементы, создавая примерно одинаковый отпор. Этот тип моста хорошо приспособлен для многопилонных систем с меньшими ограничениями по геологическим условиям оснований.

Инженерами из института мостов Технологического университета Даляня спроектированы и построены два моста такого типа в Даляне (Китай) с *составной* конструкцией БЖ из стали и железобетона:

- мост «Zhuanghe Jianshe» по схеме 46 + 110 + 46 (2008 г.), пилоны железобетонные;
- мост «Jinzhou Bay» по схеме 132 + 400 + 132 м (2006 г.) имеет рекордный пролет для ВВМ.

*Вантово-висячие мосты с ездой посередине*, когда нижние части поддерживающего кабеля образуют балочные шпренгели. Поэтому их называют еще вантово-шпренгельными мостами (рисунок 7). Известно другое название таких систем: combined cable-stayed bridges – CCSB.

Преимущества строительства ВВМ с ездой посередине:

- уменьшение высоты опор в виадуках, усиление БЖ системой вантов и нижних стоек;
- изменение эстетики и архитектурного тектонизма кабельных систем;
- строительство через глубокие долины или широкие реки без устройства сплошных подмостей.

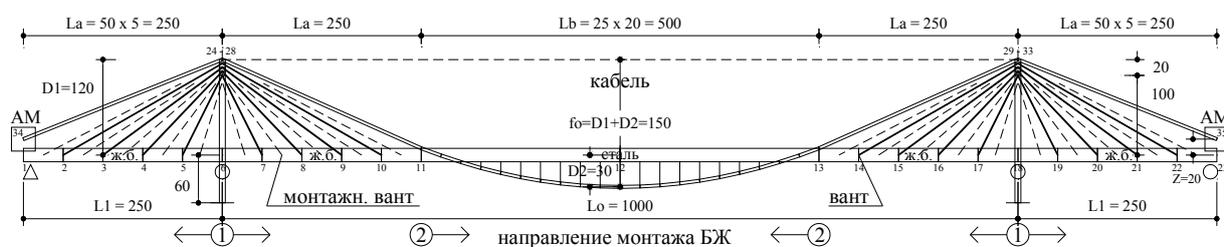


Рисунок 7 – Схема распорного вантово-висячего моста с ездой посередине

Наиболее известный ВВМ с ездой посередине – автомобильный однопролетный ( $L_0 = 258$  м) виадук «Obere Argen» (Германия, 1991 г.), он является распорным.

Распорные ВВМ могут быть применены для перекрытия пролетов до 2500 м, а безраспорные – до 1000 м.

Применим *составную* конструкцию пролетных строений из разных материалов (биконструкция БЖ):

стальные для подвесных частей  $L_b$ , где нет продольных сил от действия прикрепленного кабеля;

железобетонные (ж. б.) для консольных частей  $L_a$ , где они есть.

*Вантово-висячие мосты с криволинейными «вантами»*. Автор предлагает две новые схемы вантово-висячих мостов с криволинейными «вантами» [4].

В них основной распорный несущий кабель усиливается безраспорными дополнительными кабелями (ДК), играющими роль криволинейных «вантов»: с ярусным или сосредоточенным креплением к пилонам.

*Схема по типу «арфа»*. Трехъярусная система «арфа» имеет дополнительные криволинейные «ванты» и может найти реальное применение (рисунок 8).

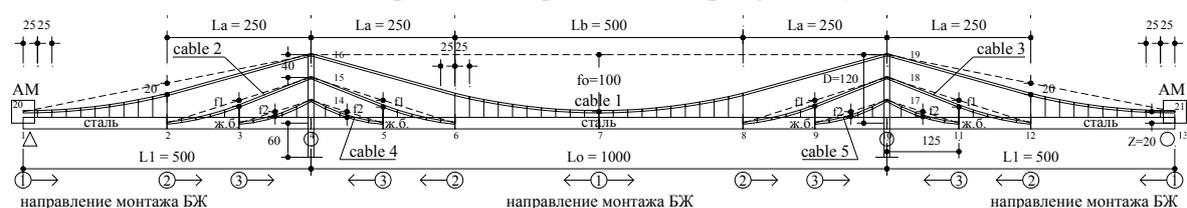


Рисунок 8 – Схема висячего моста с дополнительными криволинейными «вантами», трехъярусная «арфа»

Кабель 1 крепится к анкерным массивам и не имеет подвесок на прилегающих к пилонам участках с  $L_a = 250$  м, где включает в себя прямолинейные ветви. Кабель 1 также крепится к пилону на высоте 120 м.

ДК 2-5 играют роль криволинейных «вантов», но к этим «вантам» крепятся подвески. ДК 2-5 позволяют применять эффективное регулирование натяжения подвесок на разных участках БЖ в виде «ступенчатой эпюры», что исключено для «классических» ВМ.

Схема по типу «пучок». Одноярусная система «пучок» имеет дополнительные криволинейные «ванты» (рисунок 9). ДК крепятся к пилону в одном уровне ( $j = 1$ ), который может не совпадать с уровнем крепления распорного кабеля 1.

Система «пучок» может быть востребована благодаря оригинальному облику.

Предложенные системы мостов могут с успехом применяться не только для автодорог подвижной нагрузки, но и для железной дороги – класса С11, что допускается обоснованием «НИИ мостов» РЖД.

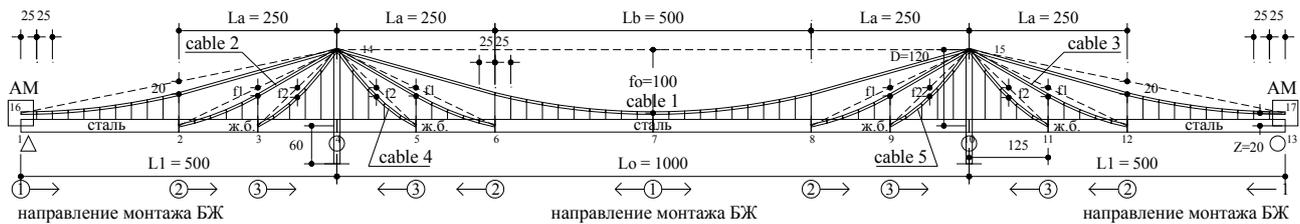


Рисунок 9 – Схема висячего моста с дополнительными криволинейными «вантами», одноярусный «пучок»

Наличие железобетонных секций БЖ и натягающих их дополнительных кабелей обуславливает повышенную аэродинамическую устойчивость по сравнению с «классическими» ВМ [4].

Новые схемы ВМ с составными БЖ и криволинейными «вантами» могут составить достойную конкуренцию как «классическим» ВМ, так и распорным ВМ с прямолинейными ваннами. Такие ВМ можно эффективно применять для перекрытия сверхгигантских пролетов с  $L_p = 4000 - 5000$  м.

Предлагаемые системы мостов (см. рисунки 8, 9) не имеют аналогов ни в существующих проектах, ни в построенных мостах. Эти системы по своим технико-экономическим характеристикам позволяют применять их под железнодорожную нагрузку на скоростных переходах между островами на Дальнем Востоке. В указанных системах балка жесткости является *составной* по длине: железобетонные секции и стальные секции, что затрудняет расчет их аэродинамической устойчивости.

*Моделирование аэродинамической устойчивости.* Предлагается теоретический подход для расчета различных аэродинамических явлений: флаттер, бафтинг.

Известны трехмерные уравнения движения для вязкого газа (аэродинамика):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + k \cdot \left[ (\delta_{ij} \cdot \nabla^2 + \frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j}) \cdot u_j \right], \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $f_i$  – вектор ускорений ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) от пульсации ветра;  $p$  – давление газа;  $k = \mu / \rho$  – кинематическая вязкость газа.

Уравнение (1) решают в терминах давления  $p$  и скорости движения  $u$ . Граничные и начальные условия для вязкого газа:  $u_n = 0$  и  $u_t = 0$ . Предлагается использовать это уравнение для моделирования обтекания ветровым потоком вокруг железобетонных секций как *несвязанной* системы.

Известны уравнения динамики метода конечных элементов при малых смещениях:

$$\mathbf{M} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{U}(t)}{\partial t^2} + \mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}(t)}{\partial t} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{M}$  – матрица масс конструкции;  $\mathbf{B}$  – матрица коэффициентов сил вязкого демпфирования;  $\mathbf{K}$  – матрица жесткости;  $\mathbf{F}$  – вектор узловых сил;  $\mathbf{U}$  – вектор узловых смещений.

При расчете аэродинамической устойчивости стальных секций дополнительно к уравнениям газа (1) предлагается рассматривать уравнения (2) для конструкции.

Для стальных секций появляется *связанная* система уравнений (1) и (2), которая позволяет моделировать флаттер. Предлагается использовать совместное решение уравнений (1) и (2) с помощью метода конечных или граничных элементов.

## Список литературы

1. Вантовые мосты [Текст] / А. А. Петропавловский, Е. И. Крыльцов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 224 с.
2. Качурин, В. К. Проектирование висячих и вантовых мостов [Текст] / В. К. Качурин, А. В. Брагин, Б. Г. Ерунов. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.
3. Дороган, А. С. Вантово-висячие мосты. Часть 1: с прямолинейными вантами [Текст] / А. С. Дороган / Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 5. – С. 1 – 9.
4. Дороган, А. С. Вантово-висячие мосты. Часть 2: с криволинейными вантами [Текст] / А. С. Дороган / Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 1. – С. 6 – 14.

## References

1. Petropavlovskii, A. A., Kryl'tsov E. I., Bogdanov N. N. *Vantovye mosty* (Cable bridges). Moscow: Transport, 1985, 224 p.
2. Kachurin, V. K., Bragin A. V., Erunov B. G. *Proektirovanie visiachikh i vantovykh mostov* (Designing of Hanging and Cable-stayed Bridges). Moscow: Transport, 1971, 280 p.
3. Dorogan, A. S. Vantovo-suspension bridges. Part 1: with rectilinear guys [Vantovo-visiachie mosty. Chast' 1: s priamolineinymi vantami]. *Stroitel'naia mekhanika i raschet sooruzhenii – Construction mechanics and calculation of structures*, no. 5, 2012, 1 – 9 pp.
4. Dorogan, A. S. Vantovo-visiachie mosty. Chast' 2: s krivolineinymi vantami [Vantovo-hanging bridges. Part 2: with curvilinear guys]. *Stroitel'naia mekhanika i raschet sooruzhenii – Construction mechanics and design of structures*, no. 1, 2013, 6 – 14 pp.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Дороган Александр Станиславович**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 407-524.

E-mail: newport@festu.khv.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dorogan Alexander Stanislavovich**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serisheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Bridges and Tunnels», FESTU.

Phone: +7 (4212) 407-524

E-mail: newport@festu.khv.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дороган, А. С. Ретроспектива вантово-висячих мостов повышенной аэродинамической устойчивости [Текст] / А. С. Дороган // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 105 – 111.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Dorogan A. S. Cable-stayed suspension bridges with high aerodynamic stability. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 105 – 112 (In Russian).

**У. Э. Эргашев, Н. И. Бегматов**

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

## **СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТВОДА ШИРИНЫ КОЛЕИ В КРИВЫХ РАДИУСОМ МЕНЕЕ 350 м**

***Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы по созданию отвода ширины колеи при ее изменении в кривых участках пути радиусом менее 350 м. Представлены существующие способы уширения или сужения ширины колеи в кривых участках пути. Предлагается способ изменения ширины колеи в кривых участках пути от 1520 до 1530 или до 1535 мм. Предложенный способ отвода ширины колеи осуществляется существующими конструкциями элементов верхнего строения пути. Предложенный способ отвода ширины колеи дает возможность плавного вписывания подвижного состава в кривой участок пути и обеспечивает требования действующих нормативов.*

***Ключевые слова:** железнодорожная кривая, переходная кривая, ширина колеи, отвод, шпалы BF70 и BF70S, скрепление Pandrol Fastclip, боковой изолятор.*

**Ulugbek E. Ergashev, Nodir I. Begmatov**

Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TIRTE),  
Tashkent, Republic of Uzbekistan

## **METHOD OF ENSURING THE WITHDRAWAL OF WIDENING OF GAUGE AT CURVES WITH RADIUS LESS THAN 350 M**

***Abstract.** In the article the issues on creation of branch of track width when changing it in the curved track with radius less than 350 m. Presented the existing methods of widening or narrowing the width of the track in the curves section of track. We propose a method of change of gauge in curved track is from 1520 to 1530 or 1535 mm. to the Proposed method of drainage of the track width is carried out by the existing structures of the elements of the superstructure. The proposed method of drainage of the track width gives a smooth fit of the rolling stock in curve track section and provides the requirements of the applicable standards.*

***Keywords:** railway curve, transition curve, track width, drainage, sleepers BF70 and BF70S, fastening Pandrol Fastclip, side insulator.*

Одним из важнейших условий обеспечения безопасности движения поездов с установленными скоростями является соблюдение норм устройства и содержания рельсовой колеи. Нормы и допуски к ним приняты на основе исследований в области взаимодействия пути и подвижного состава.

Ширина колеи – главнейшая характеристика верхнего строения железнодорожного пути. Действующими нормами [1] установлены следующие значения ширины колеи в зависимости от радиуса кривой:

- при  $R = 350$  м и более – 1520 мм;
- при  $R = 349...300$  м – 1530 мм;
- при  $R = 299$  м и менее – 1535 мм.

В кривых малого радиуса при укладке железобетонных шпал возникают проблемы по обеспечению указанных выше норм. Это связано с тем, что большинство конструкций железобетонных шпал выпускается только под ширину колеи 1520 мм.

С 2004 г. на АО «Ўзбекистон темир йўллари» начата укладка шпал типа BF70 со скреплениями Pandrol Fastclip в прямых и кривых участках пути радиусом более 349 м [2], а с 2011 г. начата укладка специальных шпал типа BF70S, которые обеспечивают возможность создания ширины колеи 1530 мм [3].

Укладка шпал типа BF70S в кривых участках пути требует устройства отвода уширения колеи с 1520 мм в прямых до 1530 мм в пределах круговой кривой. В ряде случаев на линии

Тошгузар – Бойсун – Кумкурган переходные участки с переменной шириной колеи выполнены с укладкой деревянных шпал (рисунок 1). Такое техническое решение имеет много недостатков:

- затраты валютных средств на приобретение деревянных шпал;
- изменение жесткости конструкции пути на переходных участках;
- срок службы деревянных шпал в несколько раз ниже срока службы железобетонных шпал;
- конструкция промежуточного рельсового скрепления не обеспечивает долговечности работы конструкции пути, аналогичной пути на железобетонных шпалах.



Рисунок 1 – Конструкция отвода уширения колеи с 1520 до 1530 мм с укладкой деревянных шпал (линия Ташгузар – Бойсун – Кумкурган, начало кривой – 137 км ПК 8+50)

В 2017 г. начата эксплуатация железнодорожной линии Ангрэн – Пап, построенной в горных условиях, в пределах которой имеется 20 кривых радиусом менее 350 м, что обуславливает необходимость обеспечения отводов ширины колеи при изменении колеи от 1520 до 1530 или до 1535 мм.

В связи с этим была поставлена задача укладки переходных участков с использованием только железобетонных шпал и промежуточного скрепления типа Pandrol Fastclip. Необходимо сочетание конструктивных элементов узла скрепления и железобетонной шпалы, при котором одну и ту же шпалу можно было бы использовать на прямых участках, в переходных и круговых кривых, т. е. унифицированно применительно к условиям возможности регулировки ширины рельсовой колеи с 1520 до 1530 мм.

Существуют различные способы, которые обеспечивают плавное уширение или сужение колеи в пределах кривых. Эти способы осуществляется либо за счет конструкции шпал [4], либо за счет конструкции промежуточных скреплений [4 – 7].

Регулировка ширины колеи за счет конструкции шпал производится с использованием шпалы с переменными значениями размеров ширины колеи, шаг изменения этих размеров предусмотрен в 2 мм. По всем параметрам и размерам, кроме расстояния, определяющего ширину колеи, шпалы для кривых меньшего радиуса полностью идентичны типовым желе-

зобетонным шпалам. Для изготовления таких шпал требуются дополнительно специальные шпальные формы, кроме того, комплект поставки таких шпал зависит от длины конкретного переходного участка. Исходя из этого при такой регулировке ширины колеи существенно возрастают стоимость и трудовые затраты, усложняется технология выполнения работ.

Регулировка ширины колеи за счет конструкции промежуточных креплений достигается с использованием боковых изоляторов с различной толщиной. Способ изменения ширины колеи за счет конструкции промежуточных креплений типа Pandrol Fastclip для пути колеей 1435 мм представлен в источнике [4]. Уширение рельсовой колеи осуществляется при помощи боковых изоляторов, которые варьируют размерами по пяти разновидностям. Боковое регулирование максимум на  $\pm 8$  мм на каждом рельсе или в общем для колеи  $\pm 16$  мм производится шагами, кратными 2 мм, и зависит от размера  $a$  (рисунок 2).

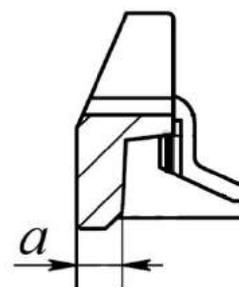


Рисунок 2 – Поперечный разрез бокового изолятора креплений типа Pandrol Fastclip

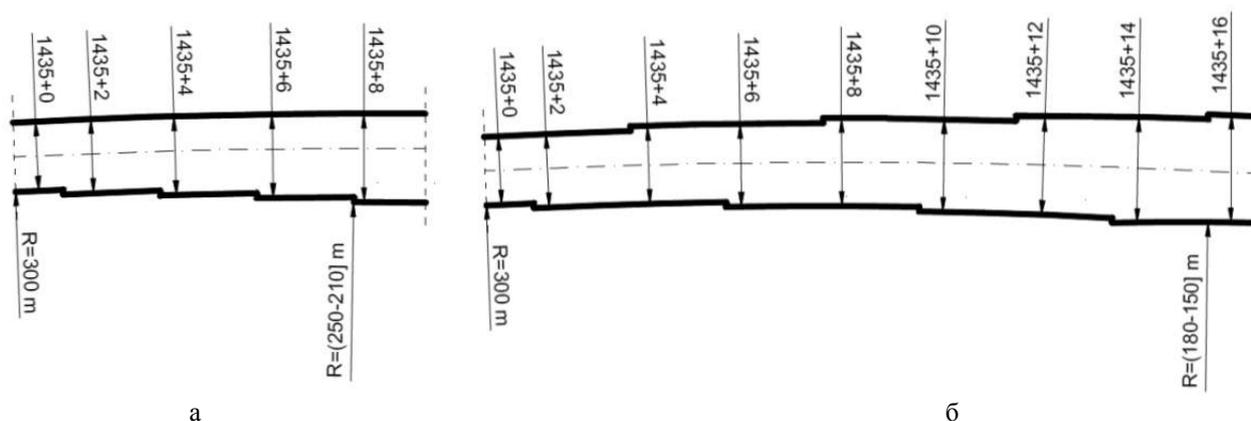


Рисунок 3 – Одностороннее (а) и двустороннее (б) уширение рельсовой колеи со креплениями типа Pandrol Fastclip по рекомендациям работы [4]

Из данных таблицы 1 видно, что в точке начала уширения колеи расположены боковые изоляторы с разной толщиной. Это указывает на то, что расстояния между анкерами больше, чем у обычных шпал. Обычно стандартная толщина боковых изоляторов крепления Pandrol Fastclip составляет 8 мм, а расстояния между анкерами – 168 мм. Уширение колеи по рекомендациям работы [4] осуществлено за счет изменения конструкции промежуточных креплений и изменения конструкции шпал, требующих дополнительных расходов и трудовых затрат.

Предлагаемый способ уширения или сужения ширины колеи производится существующими элементами конструкции верхнего строения пути. Техническим решением является устройство отвода уширения колеи на шпалах типа BF70 и BF70S. Отвод изменения ширины колеи обеспечивается за счет изменения толщины боковых изоляторов. Дополнительно необходимы боковые изоляторы креплений типа Pandrol Fastclip с толщиной 6, 7, 9 и 10 мм.

На половине участка отвода ширины колеи (примыкающем к прямой) укладываются шпалы BF70, а на другой половине (примыкающей к круговой кривой) – BF70S. Таким способом можно достигнуть плавного изменения ширины колеи от 1520 до 1534 мм с шагом изменения 2 мм. Приведем описание двух способов отвода ширины колеи.

# Путь и искусственные сооружения

Таблица 1 – Очередность раскладки боковых изоляторов при уширении колеи по [4]

Уширение, мм		0	+2	+4	+6	+8	+10	+12	+14	+16	
Толщина боковых изоляторов <i>a</i> , мм											
Одностороннее уширение	наружный рельс	внешняя сторона	16	16	16	16	16				
		внутренняя сторона	8	8	8	8	8				
	внутренний рельс	внутренняя сторона	8	10	12	14	16				
		внешняя сторона	16	14	12	10	8				
Двустороннее уширение	наружный рельс	внешняя сторона	16	16	14	14	12	12	10	10	8
		внутренняя сторона	8	8	10	10	12	12	14	14	16
	внутренний рельс	внутренняя сторона	8	10	10	12	12	14	14	16	16
		внешняя сторона	16	14	14	12	12	10	10	8	8

**Вариант 1.** Способ уширения колеи в кривых радиусом от 349 до 300 м, обеспечивающий плавный отвод колеи с 1520 до 1530 мм. Схема такого уширения представлена на рисунке 4, а очередность раскладки боковых изоляторов – в таблице 2.

Таблица 2 – Очередность раскладки боковых изоляторов при уширении колеи с 1520 до 1530 мм

Тип шпалы	Ширина колеи, соответствующая типу шпалы, мм	Толщина изолятора, мм				Уширение / сужение, мм	Ширина колеи в зоне отвода «уширение / сужение», мм
		наружная нить		внутренняя нить			
		наружная сторона	внутренняя сторона	наружная сторона	внутренняя сторона		
BF70	1520	8	8	8	8	0	1520
BF70	1520	7	9	7	9	+2	1522
BF70	1520	6	10	6	10	+4	1524
BF70S	1530	10	6	10	6	-4	1526
BF70S	1530	9	7	9	7	-2	1528
BF70S	1530	8	8	8	8	0	1530

**Вариант 2.** Способ уширения колеи в кривых радиусом 299 м и менее, обеспечивающий плавный отвод колеи с 1520 до 1534 мм. Схема такого уширения представлена на рисунке 5, а очередность раскладки боковых изоляторов – в таблице 3.

Таблица 3 – Очередность раскладки боковых изоляторов при уширении колеи с 1520 до 1534 мм

Тип шпалы	Ширина колеи, соответствующая типу шпалы, мм	Толщина изолятора, мм				Уширение / сужение, мм	Ширина колеи в зоне отвода «уширение / сужение», мм
		наружная нить		внутренняя нить			
		наружная сторона	внутренняя сторона	наружная сторона	внутренняя сторона		
1	2	3	4	5	6	7	8
BF70	1520	8	8	8	8	0	1520
BF70	1520	7	9	7	9	+2	1522
BF70	1520	6	10	6	10	+4	1524

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
BF70S	1530	10	6	10	6	-4	1526
BF70S	1530	9	7	9	7	-2	1528
BF70S	1530	8	8	8	8	0	1530
BF70S	1530	7	9	7	9	+2	1532
BF70S	1530	6*	10*	6*	10*	+4	1534

Примечание: \* – аналогичная раскладка боковых изоляторов сохраняется на всем протяжении круговой кривой.

Описанные способы уширения колеи обеспечивают требования действующих нормативов [9] по отводу ширины колеи.



Рисунок 4 – Схема отвода ширины колеи 1520 – 1530 мм на шпалах типа BF70 и BF70S в кривых радиусом от 349 до 300 м при длине переходных кривых (участок отвода уширения) 20 м



Рисунок 5 – Схема отвода ширины колеи 1520 – 1534 мм на шпалах типа BF70 и BF70S в кривых радиусом 299 м и менее при длине переходных кривых (участок отвода уширения) 20 м

Предложенный вариант регулирования ширины рельсовой колеи в пути с железобетонными шпалами и креплением типа Pandrol Fastclip выгодно отличается по трудовым затратам от аналогичной операции в пути с деревянными шпалами и дает возможность рационального использования существующих элементов верхнего строения пути.

Обеспечение плавного отвода ширины колеи улучшает благоприятное вписывание подвижного состава в кривой участок пути и способствует значительному уменьшению износа рельсов.

### Список литературы

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Республики Узбекистан, с изменениями и дополнениями / Узгосжелдорнадзор. – Ташкент, 2012. – 104 с.
2. Овчинников, А. Н. Шпалы BF70 с упругими креплениями на дорогах Узбекистана [Текст] / А. Н. Овчинников, А. Ф. Расулев, З. Т. Фазилова // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 7. – С. 35, 36.

3. Овчинников, А. Н. Исследование работы шпал BF70S в кривых малого радиуса [Текст] / А. Н. Овчинников, А. Ф. Расулев, З. Т. Фазилова // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 21, 22.
4. Конструкция железобетонных шпал и креплений для кривых участков пути, Р755. – Варшава, 2013. – 17 с.
5. Регулировка ширины колеи на железобетонных подрельсовых основаниях [Текст] / Н. Д. Кравченко, В. М. Круглов и др. // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 5. – С. 10 – 12.
6. Пат. 2373318 Российская Федерация, МПК Е 01 В 9/00, Е 01 В 2/00. Способ изменения ширины рельсовой колеи железнодорожного пути и подрельсовое основание для его осуществления [Текст] / Аксенов Ю. Н., Богачев А. Ю., Круглов В. М.; заявитель и патентообладатель Московский гос. ун-т путей сообщения. – 2007143088/11; заявл. 23.11.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.
7. Пат. 2378438 Российская Федерация, МПК Е 01 В 9/40, Е 01 В 9/46. Способ и устройство для регулирования ширины колеи железнодорожного пути [Текст] / Горюнов А. В.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИЖТ». – 2007128540/11; заявл. 24.07.2007; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.
8. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Ташкент: Узгосжелдорнадзор, 2015. – 147 с.

## References

1. *Pravila texnicheskoi ekspluatatsii jeleznykh dorog Respubliki Uzbekistana, s izmeneniyami i dopolneniyami* (Rules of technical operation of Railways of the Republic of Uzbekistan with changes and amendments). Tashkent, 2012, 104 p.
2. Ovchinnikov A.N., Rasulev A.F., Fazilova Z.T. BF70 sleepers with elastic fastenings on the roads of Uzbekistan [Shpali BF70 s uprugimi skrepleniyami na dorogax Uzbekistana]. *Put' i putevoe xozyaistvo – Track and track facilities*, 2008, no. 7, pp. 35 – 36.
3. Ovchinnikov A.N., Rasulev A.F., Fazilova Z.T. Study of BF70S sleepers in curves of small radius [Issledovanie raboti shpal BF70S v krivykh malogo radiusa]. *Put' i putevoe xozyaistvo – Track and track facilities*, 2016, no. 1, pp. 21 – 22.
4. *Konstruktsiya jelezobetonnykh shpal i skrepleniy dlya krivykh uchastkov puti* (Design of concrete sleepers and fastenings on curved sections of track), R755. Warsaw, 2013, 17 p.
5. Kravchenko N.D., Kruglov V.M., Aksenov Yu.N., Bogachyov A.Yu. Adjusting track width on the concrete rail bases [Regulirovka shirini kolei na jelezobetonnykh podrel'sovykh osnovaniyax]. *Put' i putevoe xozyaistvo – Track and track facilities*, 2010, no. 5, pp. 10 – 12.
6. Kravchenko N.D., Kruglov V.M., Aksenov Yu.N., Bogachyov A.Yu. *Patent RU 2373318*, 20.11.2009.
7. Goryunov A.V. *Patent RU 2378438*, 10.01.2010.
8. *Instruktsiya po tekushemu soderzhaniiyu jeleznodorojnogo puti* (Instructions for current maintenance of railway track), Tashkent, 2015, 147 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Эргашев Улугбек Эркинжон угли

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

И. о. заведующего научно-исследовательской лабораторией «Путь и путевое хозяйство», ТашИИТ.

Тел.: (+99893) 615-84-04.

E-mail: ulugbek.ergashev.1988@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ergashev Ulugbek Erkinjon ugli

Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TIRTE).

1, Mirobad region, Adilkhodjaev str., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

The contractor is acting head of research laboratory «Track and track facilities», TIRTE.

Phone: (+99893) 615-84-04.

E-mail: ulugbek.ergashev.1988@mail.ru

## Бегматов Нодир Исмаилович

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Путь и путевое хозяйство», ТашИИТ.

Тел.: (+99894) 933-39-71.

E-mail: nodir.begmatov.89@mail.ru

## Begmatov Nodir Ismailovich

Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (TIRTE).

1, Mirobad region, Adilkhodjaev str., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Junior researcher of the research laboratory department «Track and track facilities», TIRTE.

Phone: (+99894) 933-39-71.

E-mail: nodir.begmatov.89@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Эргашев, У. Э. Способ обеспечения отвода ширины колеи в кривых радиусом менее 350 м [Текст] / У. Э. Эргашев, Н. И. Бегматов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1(29). – С. 112 – 118.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ergashev U. E., Begmatov N. I. Method of ensuring the withdrawal of widening of gauge at curves with radius less than 350 m. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 112 – 118 (In Russian).

УДК 656.073: 658.8

## О. Д. Покровская

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ЧЕРЕЗ ТЕРМИНАЛЬНУЮ СЕТЬ

**Аннотация.** В статье приведено параметрическое описание терминальной сети и ее ключевых элементов – логистических объектов; определены факторы, влияющие на состав и конфигурацию терминальной сети; представлена модель терминальной сети как логистической цепи и на ее основе предложена комплексная теоретико-множественная модель терминальной сети региона. Предложена модель формирования состава терминальной сети. Задача поиска наилучшего варианта терминальной сети в такой постановке становится трехуровневой и двухэтапной. Результаты проведенной автором работы могут применяться как экономико-математический инструментарий при проектировании, планировании развития и оценке объектов терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** теоретико-множественная модель, терминальная сеть, логистический объект.

## Oksana D. Pokrovskaya

Siberian State University of Railway Transport (STU), Novosibirsk

## A SET-THEORETIC MODEL OF TERMINAL NETWORK

**Abstract.** The subject of the study – is a terminal network. The purpose of this study is to develop a set-theoretic model of terminal network. Research methodology bases on set theory, theory of transport systems, General systems theory and the author's methodology of terminalistics. In this study describes of the terminal network, its key elements and its logistics facilities; the factors affecting the composition and configuration of the terminal network. Also this study develops the model of the terminal network as a logistics chain, and its proposed integrated set-theoretic model of the terminal network of the region. A graphic model of the terminal network as a supply chain presents in the study. The task of finding the best option terminal network in this formulation becomes a three-tier and two-stage. The results of the study can be used as mathematical tools in the design, planning, development and evaluation of objects of terminal and warehouse infrastructure of Russian Railways.

**Keywords:** set-theoretic model, terminal network, logistics object.

Об актуальности исследования формирования терминальной сети железнодорожного транспорта, в частности, моделирования ее состава для эффективного проектирования и по-

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

следующей эксплуатации, свидетельствует Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года [1]. Одним из приоритетов развития названо эффективное формирование современной терминально-складской инфраструктуры в ключевых регионах страны, отвечающее требованиям транспортно-логистического рынка. Так, одним из сценариев развития транспортно-логистического бизнес-блока ОАО «РЖД» предусматривается стабильный рост доли транспортно-логистических услуг, реализуемых на предприятиях логистического бизнес-блока холдинга (таблица 1).

Таблица 1 – Контрольные параметры целевого состояния транспортно-логистического бизнес-блока (консервативный сценарий) [1]

Показатель	Единица измерения	Год			
		2012	2015	2020	2030
Выручка	Проценты	100	+178	+368	+750
Инвестиции без НДС	Млрд р	0,5	198,2	670,6	1 756,9
Погрузка	Млн т	1 271,9	1 309,4	1 590,0	1 786,2
Грузооборот	Млрд ткм.	2 782,6	2 932,0	3 418,1	3 905,4
Доля транспортно-логистических услуг в портфеле бизнеса холдинга	Проценты	10	20	23	23

Россия входит в число стран с высоким уровнем логистических издержек. Так, в валовом внутреннем продукте РФ доля логистических издержек доходит до 19 %, тогда как в Китае она составляет 18 %, в Бразилии и Индии – 11 – 13, в США – 8,5, в Италии – 9,7, в Японии и Германии – 8,5 и 8,8 % соответственно. Средний мировой показатель логистических издержек в 2014 г. оценивается Armstrong & Associates Inc в 11,7 % [1, 2].

О неразвитости российского рынка транспортно-логистических услуг в целом свидетельствуют следующие факты: 1) основная часть услуг в сфере перевозок и хранения грузов, а тем более управления запасами и цепочками поставок выполняется собственными службами предприятий-производителей, дистрибьюторов или ритейлеров (свыше 60 % от всего объема логистических операций); 2) в структуре рынка преобладают услуги перевозчиков, а доля услуг 3PL-провайдеров не превышает 6 % (аналогичный показатель для стран Евросоюза и Китая – 20 %); 3) низкий уровень развития сегмента комплексных логистических услуг непосредственно связан со структурой спроса со стороны сырьевых компаний, которые, как правило, готовы передать на аутсорсинг лишь базовые услуги по транспортировке и переработке грузов, оставляя за собой управление цепочками поставок.

Вместе с тем, как показывает опыт АО «РЖД Логистика», комплексное транспортно-логистическое обслуживание клиентов способно существенно снизить их логистические издержки за счет организации оптимальной системы доставки. Помимо высокого качества оказываемых услуг сегодня необходимым условием сервиса является удобная для клиента система предложения и сбыта оказываемых услуг. Сложившаяся ситуация требует принятия кардинальных мер, направленных прежде всего на достижение соответствия терминально-складской инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» современным требованиям мирового рынка транспортно-логистических услуг. Реализация подобного рода сетевых инфраструктурных проектов в условиях нестабильной мировой экономической ситуации представляется достаточно сложной задачей, тем более что логистическая инфраструктура является непрофильным бизнесом для ОАО «Российские железные дороги». В настоящее время терминально-складской комплекс компании ОАО «РЖД» составляет 28 % от общей складской инфраструктуры российского рынка. При этом доля его доходов не превышает 5 %. В структуре перерабатываемых грузов наибольшую долю составляют контейнеры (48 %) и насыпные грузы (до 37 %) [2]. Высокодоходные грузы (2-го и 3-го классов) занимают сегодня ненадлежащее место в структуре грузооборота компании. Так, в 2014 г. доля общесете-

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

вой погрузки высокодоходных грузов составляла не более 13 %. В составе Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом действуют более 530 грузовых дворов, большинство которых создавались в целях обеспечения свободного доступа в виде мест общего пользования к железнодорожной транспортной системе. На 756 железнодорожных станциях расположены объекты недвижимого имущества, опорными признаны 107 грузовых дворов. Несмотря на широкое представительство в регионах РФ терминально-складской комплекс ОАО «Российские железные дороги» имеет высокую степень износа основных фондов, устаревшие терминальные, складские и транспортные технологии, низкий уровень автоматизации процессов, «недружественный интерфейс» по взаимоотношению с клиентами и ограниченный портфель предоставляемых услуг [3, 4]. Все это является существенным фактором снижения конкурентоспособности железнодорожного транспорта по сравнению с автомобильным, происходит увеличение дальности перевозок грузов железнодорожным транспортом.

Поэтому перед компанией поставлена задача создать комплекс мультимодальных терминально-логистических центров по всей сети российских железных дорог в крупных транспортных узлах для обеспечения взаимосвязи транспортной и терминально-складской подсистем логистической цепи. По диаграмме, представленной на рисунке 1, наблюдается увеличение объема отечественного рынка транспортно-логистических услуг в РФ, что обуславливает повышение внимания ОАО «РЖД» к оптимизации логистической инфраструктуры не только на этапе ее эксплуатации, но и на этапе проектирования. Из этой же диаграммы видно, что доля логистических услуг добавленной стоимости (помимо собственно перевозочных) невелика. Обеспечить количественное и качественное развитие указанных сегментов экспедиторских, складских и иных логистических услуг невозможно при отсутствии современной, рационально запроектированной и отвечающей потребностям клиентов сети терминально-складских объектов. Формирование терминальной сети позволит не только реализовать клиентам весь спектр качественных логистических услуг, но и привлечь на железнодорожный транспорт широкую номенклатуру высокодоходных грузов. Поэтому согласно высокой актуальности вопросов проектирования и развития транспортно-логистической инфраструктуры железнодорожного транспорта в качестве предмета исследования автора была выбрана терминальная сеть.



Структура российского рынка ТЛУ в 2015 г., %



Рисунок 1 – Общий вид терминальной сети (ТС)

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Терминальную сеть можно рассматривать как систему организации перевозочного процесса с использованием логистических объектов (ЛО), размещаемых в узлах транспортной сети, на которых грузы перегружаются с одних видов транспорта на другие. Соединяющие их транспортные звенья или направления перевозок – это различные пути сообщения, транспортные коммуникации, по которым грузопотоки продвигаются из мест зарождения к местам их окончания или распыления.

Целью проведенного исследования было построение теоретико-множественной модели терминальной сети для комплексного изучения ее морфологии и эффективного ее проектирования по составу и конфигурации. Для достижения указанной цели потребовалось решение ряда задач: дать параметрическое описание терминальной сети и ее ключевых элементов – логистических объектов; определить факторы, влияющие на состав и конфигурацию терминальной сети; разработать модель терминальной сети как логистической цепи, и на ее основе предложить комплексную теоретико-множественную модель терминальной сети региона.

Сегодня логистический рынок страны не располагает устоявшейся единой терминологией в сфере транспортной и складской логистики. Во многом это связано с относительной «молодостью» отечественной логистики. Недостаточно разработан универсальный понятийный аппарат, отражающий свойства и логистическую роль объектов терминально-складской инфраструктуры транспорта. При этом указанные объекты активно участвуют в системе доставки грузов, преобразуя грузопотоки и реализуя широкий ассортимент услуг по хранению, распределению, складской переработке и перевозке грузов. Это говорит о высокой актуальности теоретико-методологических разработок в данной сфере, поскольку оптимизировать разработку новых проектов и технологию работы существующих объектов невозможно без необходимого и достаточного теоретического исследования. Отличительными особенностями предлагаемого понятийного аппарата, разработанного в теории терминалистики [5 – 7], являются обозначение целой группы объектов, реализующих логистический сервис; универсальность определения основных свойств, характерных для ЛО как транспортно-складских систем; комплексность подхода, интегрирующего терминологию железнодорожной и логистической теории и практики; отражение логистической роли ЛО в системе доставки грузов; акцент на способности обеспечить многофункциональным логистическим сервисом процесс перевозки на всем его протяжении.

В общем случае логистический объект – узловой элемент терминальной сети как системы транспортно-складской инфраструктуры, выполняющий комплекс логистических функций в системе доставки груза от начального поставщика до конечного потребителя. В качестве ЛО могут выступать объекты инфраструктуры различной сложности (грузовые площадки, склады, терминалы, распределительные и логистические центры и т. д.), физически обеспечивающие реализацию комплексного многофункционального логистического обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе. Железнодорожный ЛО – объект терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, располагаемый в транспортном узле и выполняющий функции узлового элемента терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта. Новизна этого определения состоит в обобщении в один универсальный термин целой группы предприятий, технических сооружений и устройств, с использованием которых осуществляются логистические функции на железнодорожном транспорте. Функция «транспортно-складское обслуживание» названа так, потому что является основной и типичной для всех ЛО как для буферной транспортно-складской системы, осуществляющей взаимосвязь транспорта, склада и клиента.

В частности, ЛО как узловой элемент ТС параметрически может быть описан так:

$$LO = \begin{cases} F_{ЛО}^{\Phi} = \sum_{i=1}^n C \{T_{сфр}; R_{экс}; S_{гр}\} \rightarrow \min; \\ F_{ЛО}^T = \sum_{i=1}^n C \{P; P'; Q_{пол}; A\} \rightarrow \max; \\ F_{ЛО}^K = \sum_{i=1}^n C \{K_{лог}; Q_{лог}; LOG\} \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

1-й вид – финансовый – отражает экономическую эффективность стоимости складской грузопереработки, где  $R_{экс}$  – эксплуатационные расходы по текущему содержанию ТС или ее элемента, тыс. р./год;  $S_{гр}$  – стоимость складской переработки 1 т груза, р./т;  $T_{сфр}$  – срок окупаемости инвестиций в строительство объекта по сметно-финансовому расчету, лет.

2-й вид – технический – отражает оптимальность технических решений ЛО, где  $P$  – производительность складского погрузочно-разгрузочного оборудования, т/сут;  $Q_{пол}$  – полезная емкость склада, т (полезная вместимость склада в натуральном измерении – т, единиц груза);  $A$  – уровень автоматизации логистических операций (коэффициент автоматизации – отношение полностью автоматизированных процессов на складе к общему количеству операций).

3-й вид – качественный (логистический), предложенный автором, – отражает качество оказываемых логистических услуг ЛО, где  $K_{лог}$  – комплексность логистических услуг, предоставляемых  $i$ -м складом (коэффициент комплексности логистики – отношение количества «пакетных» комплексных услуг логистики к общему объему складского сервиса);  $Q_{лог}$  – коэффициент покрытия логистикой добавленной стоимости стандартных складских операций;  $LOG$  – логистическая полезность склада. Прежде таких параметров – индикаторов состояния ЛО – не было предложено.

Терминальная сеть (ТС) – совокупность логистических объектов  $i$ -го типа и транспортных участков  $U$  протяженностью  $L$ , обслуживаемых унимодально ( $j$ ) или мультимодально ( $j'$ ), для эффективной организации грузопереработки в процессе перевозки и доставки груза от клиента  $Ki$  (1) (грузоотправителя) к клиенту  $Ki$  (2) (грузополучателю).

ТС параметрически может быть описана так:

$$TC = \begin{cases} F_{ТС}^{\Phi} = \left[ \sum_{i,n} C_{лог} \in \{R_{экс}; I; T\}; \sum_{k,m} C_{тран} \in \{S_{тран}; S_{экс}\} \right] \rightarrow \min; \\ F_{ТС}^T = \sum_{i=1}^n C \{T_{дост}; T_{ТС}; C; L_{ТС ср}; C_{ТС}; И_{ТС}\} \rightarrow \min; \\ F_{ТС}^K = \sum_{i=1}^n C \{\alpha_{лог}; R_{экс}; INF; K_{пл ЛС}; K_k; W_{ТС}; V_{ТС}; W; R_{компл}; R; E_{гр}; ЭМ_{ТС}\} \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2)$$

1-й вид – финансовый – состоит из логистического  $C_{лог}$  и транспортного  $C_{тран}$  блоков, где  $R_{экс}$  – эксплуатационные расходы по текущему содержанию ЛО, у.е./год;  $I$  – величина инвестиций в строительство и запуск в эксплуатацию ЛО, у. е.;  $T$  – срок окупаемости инвестиций в строительство объекта по сметно-финансовому расчету, лет;  $S_{тран}$  – затраты клиента на перевозку груза  $k$ -м видом транспорта по  $m$  участку ТС, у. е.;  $S_{экс}$  – эксплуатационные затраты на перевозку груза перевозчиком  $k$ -го вида транспорта, у. е.

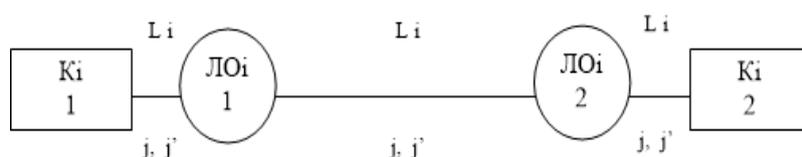
2-й вид – технико-эксплуатационный – отражает оптимальность технологий доставки и переработки грузов на ТС, где  $T_{дост общ}$  – срок доставки груза через ТС, сут;  $T_{ТС}$  – время нахождения груза в ТС, сут.;  $C$  – средняя себестоимость услуг на ТС, у. е.;  $L_{ТС ср}$  – средняя дальность перевозок по ТС, км;  $C_{ТС}$  – затраты железнодорожного транспорта, связанные с формированием ТС, у. е.;  $И_{ТС}$  – инвестиции в формирование ТС определенного состава, у.е.

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

3-й вид – качественный (логистический), предложенный автором, – отражает качество оказываемых логистических услуг, где  $\alpha_{\text{лог}}$  – охват логистической инфраструктурой региональных перевозок, %;  $R_{\text{экспл}}$  – эксплуатационная производительность участка ТС, ваг-км или ткм;  $INF$  – обеспеченность логистической инфраструктурой;  $K_{\text{пл ЛС}}$  – коэффициент плотности ТС;  $K_{\text{компл лог}}$  – коэффициент логистической локации;  $W_{\text{ТС}}$  – производительность ТС, тыс. т/год;  $V_{\text{ТС}}$  – скорость логистического обслуживания клиентов на ТС, у. е./сут;  $W$  – грузоперерабатывающая способность ТС, т/сут;  $R_{\text{компл}}$  – коэффициент комплексности сервиса;  $R$  – емкость рынка логистических услуг ТС, кл/кв. м;  $E_{\text{гр ТС}}$  – грузонапряженность ТС, тыс. т/год;  $ЭМ_{\text{ТС}}$  – мультипликативный эффект от формирования ТС. До настоящего времени таких параметров – индикаторов состояния ЛО – не было предложено.

Таким образом, для ТС и ЛО все перечисленные модули образуют блоки параметров, которые при проектировании и эксплуатации ТС и ЛО максимизируют или минимизируют. Совокупность трех укрупненных модуль-блоков позволяет получить наиболее полное описание ТС по сгруппированным множествам параметров, а также исследовать и оптимизировать ТС поэлементно, в зависимости от того, какой ее элемент характеризуется теми или иными оптимизируемыми параметрами. ТС как грузопроводящая система, в которой осуществляются логистическое обслуживание пропускаемых грузов, их терминально-складская переработка и повышение добавленной стоимости, рассматривается как логистическая цепь, состоящая из узловых элементов – начальных и конечных клиентов (отправителей и получателей груза) и ЛО (буферных грузоперерабатывающих элементов); магистральных элементов – транспортных связей; сервисных элементов – транспортных и логистических компаний, реализующих транспортировку и складскую переработку грузов в общей системе доставки грузов. Предлагается рассматривать ТС как логистическую цепь, поскольку конфигурация ТС, ее назначение в системе доставки и выполняемые на ее ЛО и транспортных участках логистические функции повторяют морфологию классической логистической цепи, соединяющей клиента-отправителя и клиента-получателя груза с обеспечением сквозного комплексного бесшовного обслуживания грузодвижения. Общий вид ТС приведен на рисунке 2.

В такой постановке и интерпретации параметрического аппарата задача моделирования ТС прежде не решалась. Высоко оценивая роль научных разработок профессоров С. М. Резера [4], П. В. Куренкова [5], В. М. Николашина и многих других отечественных ученых, а также зарубежных коллег Ж.-П. Родриге и Т. Ноттебума [6] и других, можно отметить, что ученые в сфере логистики рассматривают роль ЛО в двух аспектах: в складировании и грузопереработке товарно-материального потока или в транспортном обслуживании. В частности, организацией ЛО в системе международного транзита по транспортным коридорам занимались Лопаткин О. М., Миротин Л. Б., Персианов В. А., Прокофьева Т. А., Сергеев В. И. и др. Вопросами организации ЛО для оказания услуг по хранению и грузопереработке занимались Аникин Б. А. и Родкина Т. А. [7], Неруш Ю. М., Николайчук В. Е. и др.



Классический общий вид ТС

Рисунок 2 – Общий вид ТС

Предъявление клиентами новых требований к комплексности транспортно-логистического обслуживания актуализирует вопросы комплексного, всестороннего проектирования и исследования ЛО. О необходимости совместного рассмотрения транспортировки и складирования грузов говорится в работах Т. А. Прокофьевой [4], П. В. Куренкова [5], Б. И. Аникина [7], О. Б. Маликова [8], В. В. Дыбской [9], В. И. Сергеева [10] и других ученых. Известные научные исследования Московской логистической школы под руководством

профессоров В. В. Дыбской, В. С. Лукинского, Л. Б. Миротина, Т. А. Прокофьевой, С. М. Резера, В. И. Сергеева [4, 5, 7 – 10] реализуют решение задач моделирования логистических систем. К вопросам, рассматриваемым ими, относятся финансовые показатели, управление инвестиционными проектами, экономико-географическое позиционирование логистических систем, прогнозирование и оптимизация цепей поставок, проектирование складских комплексов как логистических и технических систем. В зарубежных исследованиях преобладают вопросы транспортной географии и дислокации грузоперерабатывающих комплексов, мультимодальной доставки с их использованием, например, в [6]. Высоко оценивая полученные названными учеными достижения, следует отметить, что, к сожалению, исследования носят не в полной мере комплексный характер, который проявляется в достаточно одностороннем рассмотрении терминальных систем: как объект проектирования (В. В. Дыбская), оптимизации и параметризации (В. С. Лукинский), экономико-географическое образование (Т. А. Прокофьева), логистическая система (В. И. Сергеев), система внешнеэкономического транзита (П. В. Куренков, С. М. Резер). При этом не рассматривается взаимосвязь терминально-складской инфраструктуры транспорта с собственно перевозочным процессом. Освещены лишь экономический, логистический, географический и проектировочный аспекты сущности ЛО и ТС, но не уделено достаточного внимания технологии взаимодействия видов транспорта на ЛО в составе ТС, проектированию сложных систем доставки, т. е. не осуществлен комплексный многоаспектный транспортно-логистический подход к проектированию и эксплуатации ТС не только как логистической, но сложной транспортно-логистической системы.

Предложенная экономико-математическая модель имеет следующие особенности: 1) представление ТС как логистической цепи; 2) комплексность подхода, интегрирующего значимые при проектировании и эксплуатации ТС и ЛО параметры в техническом, технологическом, экономическом, транспортном и логистическом аспектах; 3) модульно-блочное представление структуры параметрического описания ТС и ЛО как транспортно-складских систем; 4) поиск наилучшего варианта построения ТС с использованием авторских целевых функций и параметров в символах теории множеств, усложненный трехуровневым и двухэтапным решением задачи проектирования ТС; 5) применение авторского терминологического и экономико-математического аппарата, представления и состава ТС и ЛО.

Обобщенная теоретико-множественная модель ТС имеет вид:  $ТС = \{ЛО; E; C; W\}$ , где ЛО – множество логистических объектов, входящих в состав ТС, ед.; E – множество логистических и «околотранспортных» технологических операций, повышающих потребительские свойства груза (товара), его добавленную стоимость, ед.:  $E = \{E_1, E_2, E_3\}_i$ , где  $E_1$  – множество минимально необходимых логистических внутрискладских операций по грузопереработке (приемка-выдача, погрузка-выгрузка, сортировка) стандартного ассортимента, ед.;  $E_2$  – множество расширенных логистических услуг «вне склада» – экспедирование груза, страхование, растаможивание, последняя миля и другие услуги расширенного ассортимента, ед.;  $E_3$  – множество логистических услуг, направленных на повышение потребительских свойств груза (монтаж, сборка, предпродажная подготовка, маркировка, упаковка и другие услуги максимального ассортимента, ед.; C – множество критериев, характеризующих состояние ТС:

$$C = \prod_{i=1}^i (C_{\text{тех}} + C_{\text{лог}}) C_{\text{персп}}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{тех}}$  – критерий состояния ТС, отражающий инфраструктурное обеспечение и техническую оснащенность как ТС в целом, так и ее отдельных элементов (участков и узлов);  $C_{\text{лог}}$  – критерий состояния ТС, отражающий ассортимент, качество и удовлетворенность клиентов транспортно-логистическим сервисом, реализуемым ТС в регионе;  $C_{\text{персп}}$  – коэффициент учета сценария развития терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД» и (или) программ социально-экономического развития региона, принимается равным 1,0 при средней по

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

региону величине занимаемой ЛО площади не более 30 % от общей площади торговых помещений федеральных сетей;  $C_{персп} = 1,5$  при наличии в регионе более одного проекта развития терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД»;  $C_{персп} = 1,3$  при устойчивом росте ВРП за последние пять лет;  $C_{персп} = 1,8$  при реализации требований второго и третьего пунктов;  $W$  – вариант конфигурации ТС – совокупность отношений между узлами ТС и транспортными участками:  $W = \{W_i\}$  при  $i = 1, 2 \dots n$ .

Автором были установлены факторы, влияющие на структуру ТС. При этом два показателя (выделенные в таблице 2) являются авторскими [3].

Таблица 2 – Факторы, влияющие на формирование ТС

Фактор	Описание фактора	Ед. изм.
<b>Инфраструктурные <math>\Phi_{инф}</math></b>		
$R_{ад}$	Густота (плотность) автомобильных дорог в регионе	км/ кв. км
$I_{жд}$	Грузонапряженность железнодорожных линий	ткм
$L_{фед}$	Протяженность (при наличии) автомобильных трасс федерального значения в регионе	км
$N_{РЖД}$	Наличие в регионе объектов опорной сети терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД» (в соответствии с Концепцией создания сети ТЛЦ в РФ),	ед.
$K_{скл}$	Показатель качества терминально-складского обслуживания $K_{скл} = \frac{S_{кач}}{\sum S_{рег}}$ где $S_{кач}$ – общая площадь качественных складских площадей класса «А», «А+» по международным классификациям, тыс. кв. м; $\sum S_{рег}$ – суммарная площадь складских комплексов в регионе, тыс. кв. м	безразм.
$R_{инфр}$	Наличие резервов грузоперерабатывающей способности терминально-складской инфраструктуры региона	т/год
<b>Транспортные <math>\Phi_{тран}</math></b>		
$Q_{жт}$	Объемы перевозок грузов железнодорожным транспортом	тыс. т/год
$Q_{ат}$	Объемы перевозок грузов автомобильным транспортом	тыс. т/год
$Q_{др}$	Объемы перевозок грузов другими видами транспорта	тыс. т/год
$R_{тр}$	Наличие резервов пропускной способности транспортных коммуникаций	тр.ед./год
$N_{ту}$	Количество крупных транспортных узлов в регионе	ед.
$K_{ТЛО}$	Показатель транспортно-логистической обеспеченности региона $K_{ТЛО} = \frac{K_{скл}}{\sum (\frac{N_{РЖД}}{N_{скл}} + N_{скл})}$ где $K_{скл}$ – показатель качества терминально-складского обслуживания; $N_{скл}$ – суммарное количество ЛО в регионе независимо от классности, ед.; $N_{РЖД}$ – суммарное количество ЛО ОАО «РЖД», ед.	%
<b>Рыночные <math>\Phi_{рын}</math></b>		
$N_{пр}$	Наличие в регионе реализуемых национальных экономических и транспортных проектов	ед.
$Q_{врп}$	Валовой региональный продукт	р.
$Q_{опт}$	Объемы оптовой торговли	р.
$Q_{тр}$	Объемы транспортных услуг	р.
$N_{нас}$	Численность населения	млн чел.

Состав терминальной сети можно представить как совокупность определенного количества ЛО, размещенных на некотором количестве участков сети  $U$ , характеризующихся определенными параметрами для обеспечения перевозок:  $ТС = \{ЛО_i; U_i\}$ , где ЛО – подмножество  $n$  количества ЛО  $i$ -го типа (по авторской классификации), расположенных на участке  $u$  ( $j$  – унимодальном и  $j'$  – мультимодальном), входящих в ТС, ед.;  $U$  – подмножество  $n$  количества транспортных участков  $j$  – и  $j'$ -го типа, соединяющих клиентов и ЛО в ТС, ед. Изложенное выше иллюстрирует рисунок 3.

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

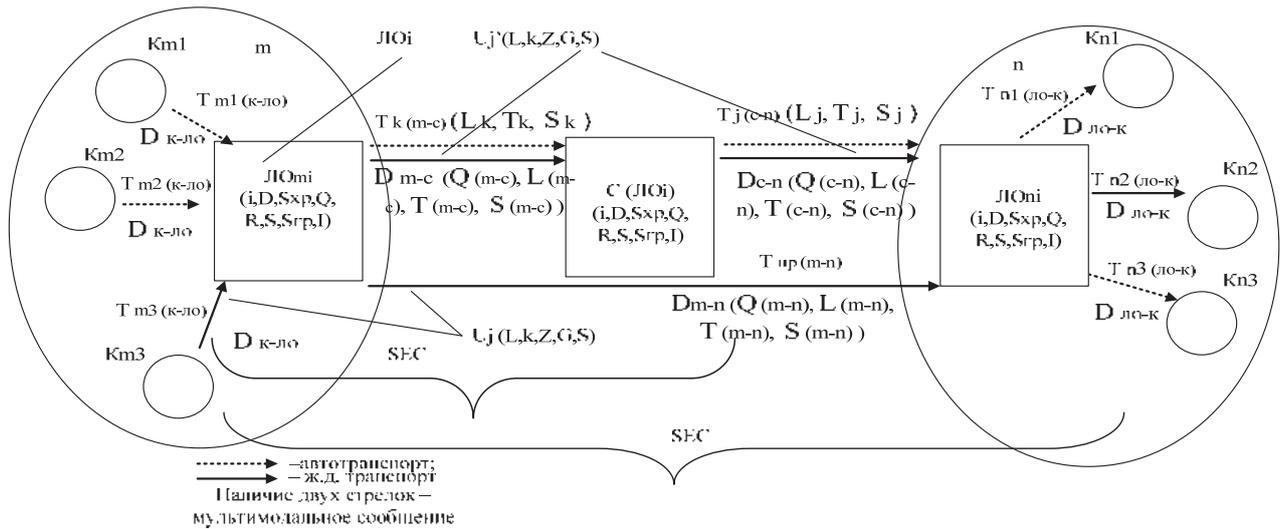


Рисунок 3 – ТС как логистическая цепь

Каждой дуге – направлению грузопотока, который движется от отправителей  $m$  (овал) к получателям  $n$  (овал), – соответствуют определенный объем груза, расстояние участка перевозки, срок доставки на участке перевозки и стоимость перевозки груза  $k$ -м видом транспорта:  $D_{mn} \in \{Q_{mn}; L_{mn}; T_{mn}; S_{mnk}\}$ . Каждому  $k$ -му виду транспорта (подписи дуг) соответствуют тарифное расстояние, срок доставки и тариф на перевозку груза:  $T_k \in \{L_{mnk}; T_{mnk}; S_{mnk}\}$ . Дуги и их подписи представляют собой  $U$  – транспортные участки  $j$ -го типа ( $j$  – унимодальные и  $j'$  – (мультимодальные):  $\sum U_{in}^{j,j'} = \sum \{L; k; Z; G; S\}$ , где  $L$  – протяженность участка ТС, км;  $k$  – вид транспорта, обслуживающий данный транспортный участок (unit);  $Z$  – техническая оснащенность участка ТС (покрытие ЛО),  $G$  – грузонапряженность участка ТС; – затраты по текущему содержанию и ремонту участка ТС, у. е./год.

Каждому из  $n$  узлов цепи – ЛО (квадраты) – соответствуют определенный тип (по авторской классификации –  $1 \dots 9$ ); дислокация (координаты), км; площадь хранения, кв. м; грузоперерабатывающая способность (мощность), тыс. т/год (конт/год, подд/год и др.);  $R$  – радиус обслуживания ЛО клиентов, км;  $S$  – ассортимент реализуемого ЛО транспортно-логистического сервиса, наимен.;  $S_{гр}$  – стоимость грузопереработки, у. е./ед.;  $I$  – инвестиции в строительство ЛО, у. е.:  $\sum ЛО_{in}^{j,j'} = \sum \{i; D; S_{xp}; Q; R; S; S_{гр}; I\}$ . Для декомпозиции структуры ТС при исследовании и последующей оптимизации ТС введем понятие «сектор ТС» – это совокупность некоторых транспортных участков и некоторых ЛО, соединенных частью логистической цепи доставки груза по маршруту от начального (грузоотправителя) до конечного клиента (грузополучателя):

$$SEC_i = \left\{ \sum U_{in}^{j,j'} ; \sum ЛО_{in}^{j,j'} \right\} \text{ при количестве ЛО и секторов } N_{ЛО ni} \geq 2; 1 \geq N_{sec ni} < N_{ЛО ni}.$$

Конфигурация ТС  $CNF(ТC_{alt})$  – это морфологическая структура элементов ТС:

$$CNF(ТC_{alt}) = VAR\{ТC_i\} \parallel CNF(ТC_{alt}),$$

где  $CNF(ТC_{alt})$  – альтернативный вариант конфигурации ТС;  $\parallel$  – дизъюнкция, или логическое «или»;  $VAR\{ТC_i\}$  – вариант параметрической структуры ТС, включая тип ЛО и состав реализуемых ими услуг для клиента (транспортных, логистических и дополнительных услуг).

Математическая модель ТС как логистической цепи имеет вид:

$$K (ЛО_m)_i \rightarrow T_{k(m-c)} \rightarrow C (ЛО_i) \rightarrow T_{j(c-n)} \rightarrow K (ЛО_n)_i,$$

где  $K (ЛО_m)_i$  – клиент-грузоотправитель, пользующийся услугами логистического объекта ЛО  $i$ -го типа в пункте отправления груза  $m$ ;  $T_{k(m-c)}$  –  $k$ -й вид транспорта, работающий на участке доставки груза от пункта отправления груза  $m$  до центрального ЛО;  $C (ЛО_i)$  – центральный ЛО  $i$ -го типа на ТС, на который прибывают грузы  $k$ -м видом транспорта, отправляются  $j$ -м видом транспорта;  $T_{j(c-n)}$  –  $j$ -й вид транспорта, работающий на участке доставки груза от склада (ЛО) терминальной сети  $i$ -го типа до пункта назначения груза  $n$ ;  $K (ЛО_n)_i$  – клиент-грузополучатель, пользующийся услугами ЛО  $i$ -го типа в пункте назначения груза  $n$ .

Теоретико-множественная модель ТС. Пусть в зоне рыночного покрытия ТС находится множество ЛО  $F$ ,  $i$ -го типа, при этом  $f \in F$ . ЛО могут работать самостоятельно или в составе логистической цепи.

1-я часть – сервисная (цена и себестоимость грузопереработки на ЛО). Множество комплексных логистических услуг, реализуемых каждым ЛО, обозначим  $KF$ .  $KF \in F$ ,  $K_f \in [F_{k_1}, F_{k_2}, F_{k_3}, \dots, F_{k_f}]$ . Для каждого ЛО  $F_{k_f} \in F$  известны цена ( $C_{k_f}$ ) и себестоимость ( $S_{k_f}$ ) единицы  $j$ -й логистической операции (переработки единицы груза на ЛО). Тогда  $LOG$ ,  $LOG (\sum_i \sum_N \sum_j ЛО) = (C_{k_f} - S_{k_f})$  на каждом из  $N$  числа ЛО  $i$ -го типа, реализующих  $J$  ассортимент логистических услуг, представляет собой валовой доход владельца ЛО при реализации логистического обслуживания клиентуры. Для реализации комплексной услуги ЛО определяет множество участников (исполнителей) по каждой логистической операции для обеспечения работы отдельного логистического звена. Каждой из таких операций будут соответствовать транзакционные издержки, связанные с организацией ее выполнения (стоимость услуг сторонней компании-исполнителя или себестоимость грузопереработки собственными силами): цена ( $C_{k_f}$ ), себестоимость ( $S_{k_f}$ ) и соответствующие транзакционные издержки ( $I_{k_f}$ ) [8]. Очевидно, что чем больше участников (исполнителей) отдельных логистических услуг включает в себя ЛО при реализации сервиса «в одно окно», тем выше будут транзакционные издержки и тем ниже надежность всей логистической цепи, что, в свою очередь, определяет необходимость страхования рисков как заказчиков, так и исполнителей работ. Соответственно общая стоимость прохождения груза через ТС будет равна стоимости комплексного логистического обслуживания процесса перевозок с участием ЛО: для клиента-заказчика  $LOG' (\sum_i \sum_N \sum_j ЛО) = (C_{k_f cp} - C'_{k_f})$  – инвестиционная привлекательность ЛО для клиента, где  $C'_{k_f}$  – стоимость логистического обслуживания на том ЛО, услугами которого он пользуется, у. е.;  $C_{k_f cp}$  – средняя стоимость услуг у конкурентов ЛО на рынке региона нахождения, у. е.; для владельца ТС (ЛО):  $LOG (\sum_i \sum_N \sum_j ЛО) = (C_{k_f} - S_{k_f})$  – валовой доход. В сервисном аспекте ЛО при ассортименте услуг, реализуемых ЛО,  $J_{LO n} \in [j_{i_1}, j_{i_2}, j_{i_3}, \dots, j_{i_n}]$ ,  $j_{i_n}$ , с учетом стоимости  $C_{j_i}$ , объема  $n_{j_i}$  и транзакционных издержек на их выполнение (при наличии)  $I_{j_i}$  можно описать: ЛО серв =  $\prod(j_i; n_{j_i}; C_{j_i}; I_{j_i})$ .

2-я часть – транспортная (тарифная стоимость перевозки грузов через ТС с грузопереработкой на ЛО, в том числе автомобильные участки «последняя миля»). Пусть в зоне рыночного покрытия ТС  $F$  находится множество ЛО  $f$ ,  $i$ -го типа, при этом  $f \in F$ . Множество ЛО, находящихся в проектируемой ТС, обозначим  $RF$ .  $RF \in F$ ,  $R_f \in [F_{r_1}, F_{r_2}, F_{r_3}, \dots, F_{r_f}]$ . Перевозка грузов через ТС состоит из следующих элементов: 1) подвоз-вывоз груза с (на) железнодорожную станцию отправления, точнее, на железнодорожный ЛО. Не стоит забывать и о том, что непосредственно в месте производства груза тоже присутствует ЛО, услугами которого клиент пользовался при накоплении грузов; 2) ЛО в месте производства (потребления) груза; 3) переработка груза на железнодорожном ЛО; 4) магистральная перевозка железнодорожным транспортом между ЛО (блок-трейн); 5) переработка груза на железнодорожном ЛО в пункте назначения; 6) подвоз-вывоз груза с (на) железнодорожной станции назначения; 6) ЛО в месте производства (потребления) груза. 1,2 и 6,7 связи могут обслуживаться как автотранспортом, так и промышленным железнодорожным транспортом.

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Соответственно тарифная стоимость перевозки груза по ТС для  $i$ -го груза, перевозимого из пункта  $m$  в пункт  $n$   $k$ -м видом транспорта с оказанием  $j$ -го пакета транспортных услуг, общая стоимость перевозочного процесса (выполнения чисто транспортных, погрузочно-разгрузочных и подготовительно-заключительных операций без использования ЛО, т. е. кроме части 1 данной модели) по всем участкам ТС будет равна: для клиента-заказчика услуги:  $LOG'_{\text{тран } mn}(\sum_i \sum_k \sum_j C_{mn}) = C_{\text{тариф}}$ , где  $C_{\text{тариф}}$  – тариф за перевозку груза из пункта  $m$  в пункт  $n$ , при этом пунктами  $m$  и  $n$  могут быть как ЛО, так и пункты отправления/назначения груза как граничные точки расстояния перевозки, у. е.; для владельца ЛО (ТС):  $LOG_{\text{тран } mn}(\sum_i \sum_N \sum_j \cdot LO) = (C_{kf} - S_{kf})$ .

3-я часть – конфигурирование наилучшего варианта ТС с учетом 1,2.

Требуется отыскать такой альтернативный вариант состава ТС по типам ЛО, их мощности и размещения, при котором будет реализован минимум целевой функции:

$$ALT(ТС, LO) = VAR(LO_{iQ(XY)_1}, LO_{iQ(XY)_2}, \dots, LO_{iQ(XY)_n} \in ТС) \sum_{n=1}^n (s_{инв}) \rightarrow \min(T).$$

Наилучшим вариантом ТС признается такое альтернативное сочетание некоторого количества  $n$  ЛО определенного типа  $i$ , мощности  $Q$  (в кв. метрах или в тоннах перерабатываемого груза) и размещения  $(XY)$  в составе ТС, суммарные капиталовложения в строительство и техническое оснащение которого обеспечат минимальный срок окупаемости  $T$ . Задача поиска наилучшего варианта ТС (НВТС) становится трехуровневой и двухэтапной. Уровни: 1) на первом уровне решается вопрос выбора типа и других параметров ЛО, включаемых в состав ТС; 2) на втором уровне решается вопрос о варианте конфигурации ТС по количеству, размещению и мощности ЛО, входящих в ее состав; 3) на третьем уровне решается вопрос организации перевозок через запроектированную ТС с позиций клиентоориентированности и логистики. Этапы: 1-й этап – это проектирование ЛО и ТС, а 2-й этап – организация перевозок через запроектированную ТС. Главная цель оптимизации технического оснащения и функционирования ТС – найти такие параметры ТС в целом и ее отдельных элементов (участков и узлов), которые обеспечат минимум суммарных приведенных затрат при удовлетворении ограничений по эксплуатационным и экономическим соображениям.

Поиск НВТС в общем случае сводится к определению количества, мощности и размещения узловых элементов ТС – ЛО различного типа. Это влечет за собой необходимость решения задачи эффективного распределения грузовой работы как по отдельным секторам ТС (их размеры, как правило, подпадают под территорию крупных транспортных узлов), так и по отдельным ЛО сети [3]. Таким образом, теоретико-множественная модель ТС и методика поиска НВТС позволяют комплексно оптимизировать транспортно-складские системы, не только по отдельным узлам (ЛО) или транспортным участкам, но и конфигурировать отдельные сектора ТС, принимая интегрированные решения с учетом эксплуатации транспорта, организацией складирования, управления системой доставки.

Результаты проведенного автором статьи исследования могут применяться как экономико-математический инструмент при проектировании, планировании развития и оценке объектов терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД».

### Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года [Текст]. М.: Красный пролетарий, 2013. – 152 с.
2. Гапанович, В. А. Развитие терминально-логистической инфраструктуры ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / В. А. Гапанович // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 5 (30). – С. 51 – 56.
3. Pokrovskaya O. D. Logistical management: mathematical foundations of terminality, labeling, classification and identification of logistical objects of a railway transportation: monograph / O. D. Pokrovskaya. – Kazan: Buk, 2017. – 281 p.

4. Резер С. М. Международные транспортные коридоры: проблемы формирования и развития [Текст] / С. М. Резер, Т. А. Прокофьева, С. С. Гончаренко / ВИНТИ РАН. – М., 2010. – 312 с.
5. Куренков, П. В. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении. Экономика. Логистика. Управление [Текст] / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2002. – 636 с.
6. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom and J-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific. – 2009. – № 78. – P. 1 – 39.
7. Логистика: Учебное пособие [Текст] / Под ред. Б. А. Аникина. – М.: Инфра-М, 1999. – 327 с.
8. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок [Текст] / О. Б. Маликов / УМЦ ЖДТ. – М., 2014. – 536 с.
9. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок [Текст] / В. В. Дыбская. – М.: Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.
10. Сергеев, В. И. Общие тенденции развития логистических центров за рубежом [Текст] // В. И. Сергеев / Логистика и управление цепями поставок. – 2012. – № 5 (52). – С. 45 – 49.

## References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 goda* (Strategy for the development of the railway transport of the Russian Federation for the period until 2030). Moscow: Krasnyy proletariy, 2013, 152 p.
2. Gapanovich V. A. *Razvitie terminal'no-logisticheskoy infrastruktury OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi»* (Development of terminal-logistics infrastructure of JSC «Russian Railways»). 2010, no. 5 (30), 51 – 56 pp.
3. Pokrovskaya O. D. *Logistical management: mathematical foundations of terminality, labeling, classification and identification of logistical objects of a railway transportation: monograph*. Kazan: Buk, 2017, 281 p.
4. Rezer S. M., Prokofeva T. A., Goncharenko S. S. *Mezhdunarodnye transportnye koridory: problemy formirovaniya i razvitiya* (International transport corridors: the problems of formation and development). Moscow: VINITI RAN, 2010, 312 p.
5. Kurenkov P. V., Kotlyarenko A. F. *Vneshnetorgovye perevozki v smeshannom soobshchenii. Ekonomika. Logistika. Upravlenie* (Foreign trade in a mixed message. Economics. Logistics. Management). Samara: SamGAPS, 2002, 636 p.
6. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom and J-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific. – 2009. – no. 78, 1 – 39 pp.
7. Aniknn B. A. *Logistics: Textbook* (Logistika). Moscow: INFRA-M, 1999, 327 p.
8. Malikov O. B. *Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepyakh postavok* (Transport and warehousing of goods in supply chains). Moscow: UMTs po obrazovaniyu na zh.d. transporte, 2014, 536 p.
9. Dybskaya V. V. *Upravlenie skladirovaniem v tsepyakh postavok* (General tendencies in the development of logistics centers abroad). Moscow: Al'fa-Press, 2009, 720 p.
10. Sergeev V. I. General tendencies in the development of logistics centers abroad [Obshchie tendentsii razvitiya logisticheskikh tsentrov za rubezhom]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok – Logistic and supply chain management*, 2012, no. 5 (52), 45 – 49 pp.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Покровская Оксана Дмитриевна**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Pokrovskaya Oksana Dmitrievna**

Siberian State University of Railway Transport (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

E-mail: insight1986@inbox.ru

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Logistics, commercial work and rolling stock», STU.

E-mail: insight1986@inbox.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Покровская, О. Д. Моделирование системы организации перевозочного процесса через терминальную сеть [Текст] / О. Д. Покровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 118 – 130.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pokrovskaya O. D. A set-theoretic model of terminal network. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 118 – 130 (In Russian).

УДК 656.216:65.011.56

**М. М. Соколов**

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

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию внутренних параметров трансформаторов, применяемых для электропитания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. В работе рассмотрено изменение номограммы области входного сопротивления силового трансформатора при изменении параметров схемы замещения этого трансформатора. Показана возможность визуализации изменения параметров трансформатора с применением математического аппарата конформных отображений. Построены номограммы входного сопротивления трансформатора марки ОМ-1,2/10 при изменении значения сопротивлений изоляции и переходного сопротивления в местах соединений. На основании построенных номограмм сделаны выводы о поведении области входного сопротивления трансформатора в различных ситуациях.

**Ключевые слова:** Электроснабжение, нетяговые потребители, трансформатор, конформное отображение, четырехполюсник.

**Maxim M. Sokolov**

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

## DISPLAYING THE CHANGING LINEAR TRANSFORMERS PARAMETERS IN THE SYSTEMS OF RAIL AUTOMATICS AND TELEMCHANICS

**Abstract.** This article is devoted to the investigation of the internal parameters of transformers used for power supply of railway automatic and telemechanic devices. In this paper, the change in the nomogram of the impedance area of a power transformer is considered when changing the parameters of the replacement circuit of this transformer. The possibility of visualizing the change in the parameters of a transformer using the mathematical apparatus of conformal mappings is shown. The nomograms of the input resistance of the single-phase oil transformer are constructed with a change in the value of the insulation resistance and the transient resistance at the junction points. Based on the constructed nomograms, conclusions were drawn on the behavior of the input impedance region of the transformer in various situations.

**Keywords:** Power supply, non-traction consumers, transformer, conformal mapping, four-terminal network.

Согласно стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. одной из стратегических задач в сфере содержания и ремонта инфраструктуры является расширение практики планирования обслуживания и ремонтов оборудования по фактическому состоянию с учетом прогнозируемых предотказных состояний и рисков. Решение данной задачи невозможно без разработки систем мониторинга и диагностирования в реальном времени, в том числе в хозяйстве электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД».

Электрическая энергия на сети железных дорог расходуется как на тяговые нужды, так и

на электроснабжение нетяговых потребителей.

Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) относятся к нетяговым потребителям I категории и должны получать питание от надежных постоянно действующих энергосистем, электростанций, подстанций или линий электропередач, располагающих достаточной мощностью и имеющих стабильную частоту и напряжение на своих шинах [1].

Электропитание устройств автоматики и телемеханики на перегонах и малых станциях осуществляется от высоковольтных линий (ВЛ) сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Электроэнергия по ВЛ СЦБ передается от трансформаторной или тяговой подстанции в зависимости от рода тяги на участке железной дороги.

ВЛ СЦБ выполняются трехфазными трехпроводными с изолированной нейтралью напряжением 6 или 10 кВ.

Электрическая энергия от ВЛ СЦБ к потребителю поступает через линейный трансформатор марки ОМ или ОЛ (рисунок 1), который подключается к двум нижним проводам линии электроснабжения.

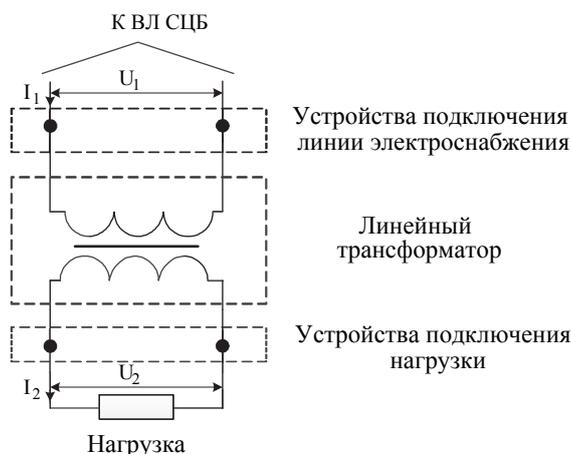


Рисунок 1 – Схема подключения трансформатора

В качестве нагрузки трансформатора может рассматриваться любое устройство ЖАТ, получающее электрическую энергию от ВЛ СЦБ. Например, релейный шкаф автоблокировки, линейный пункт по обнаружению нагретых букс, переездные устройства.

В дальнейшем под термином «линейный трансформатор» будем подразумевать электрическую схему (см. рисунок 1), состоящую из трех элементов: схемы трансформации напряжения, устройств подключения линии электроснабжения и устройств подключения нагрузки (устройства защиты, клеммные соединения и др.).

Каждый элемент рисунка 1 можно представить схемой замещения в виде четырехполюсника (ЧП) [2].

Классически связь между напряжениями и токами на входе и выходе ЧП устанавливается при помощи системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{вх}} = A \cdot \dot{U}_{\text{вых}} + B \cdot \dot{I}_{\text{вых}}; \\ \dot{I}_{\text{вх}} = C \cdot \dot{U}_{\text{вых}} + D \cdot \dot{I}_{\text{вых}}. \end{cases} \quad (1)$$

Эквивалентная схема замещения представляется в виде каскадного соединения трех ЧП (рисунок 2).

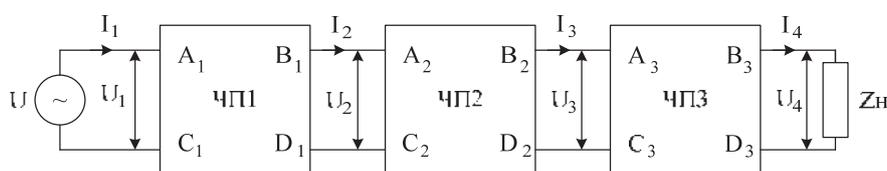


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  характеризуются параметрами каждого из элементов схемы. В нашем случае, имея каскадное соединение трех ЧП, получим:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_4 \\ \dot{I}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{\text{ЭКВ}} & B_{\text{ЭКВ}} \\ C_{\text{ЭКВ}} & D_{\text{ЭКВ}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_4 \\ \dot{I}_4 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{ЭКВ}}$ ,  $B_{\text{ЭКВ}}$ ,  $C_{\text{ЭКВ}}$ ,  $D_{\text{ЭКВ}}$  – коэффициенты ЧП эквивалентной схемы замещения.

Для определения параметров схемы замещения линейного трансформатора, используемого для электропитания устройств автоматики, можно воспользоваться общепринятой методикой [3].

В качестве математического аппарата для анализа параметров полученного эквивалентного ЧП предлагается использовать более быстрый и точный по сравнению с матричным аппарат конформных отображений [4].

Конформным отображением называется биекция области  $Z$  на область  $W$  такая, что в окрестности любой точки  $Z$  главная часть взаимнооднозначного отображения есть ортогональное преобразование с сохранением ориентации [5].

Отображение множества выходных параметров  $Z$  четырехполюсника на множество входных параметров  $W$  выполняется с использованием дробно-линейного преобразования:

$$W = \frac{A \cdot Z + B}{C \cdot Z + D}. \quad (3)$$

Номограмма входного сопротивления эквивалентного ЧП при дробно-линейном преобразовании правой полуплоскости представлена на рисунке 3 [6].

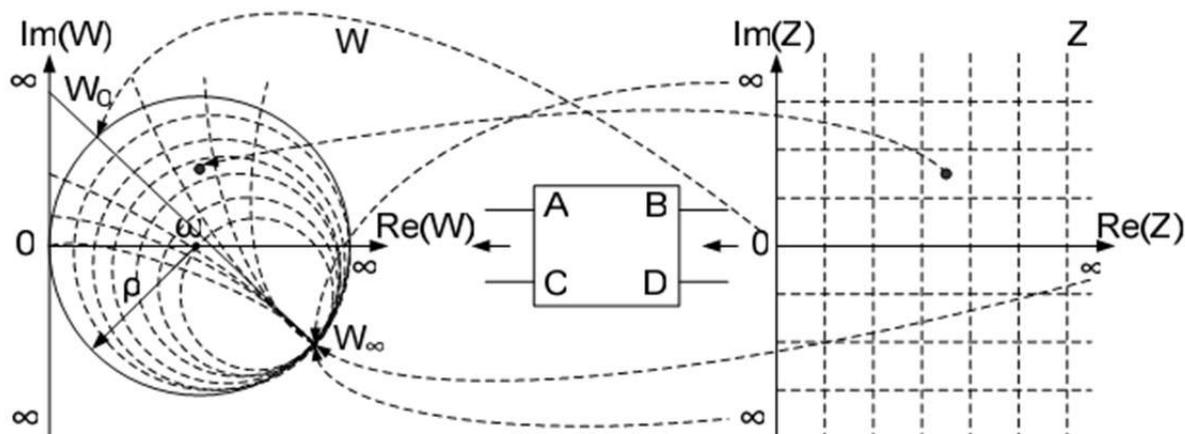


Рисунок 3 – Номограмма входного сопротивления эквивалентного ЧП при дробно-линейном преобразовании правой полуплоскости

В результате конформного преобразования правой полуплоскости получаем множество значений входных сопротивлений четырехполюсника, имеющего форму окружности и соответствующего всем возможным значениям выходного сопротивления (сопротивления нагрузки) [6]. Таким образом, вместо бесконечного количества возможных сопротивлений нагрузки возможно получение конечной области входных сопротивлений эквивалентного четырехполюсника.

Аппарат конформных отображений позволяет вычислить образы соответствующих окружностей. При этом правая полуплоскость множества выходных параметров представляется сеткой значений, т. е. отображением прямых, параллельных оси ординат, и прямых, параллельных оси абсцисс [7].

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Согласно утверждению работы [5] центры и радиусы отображаемых окружностей определяются по следующим формулам:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \bar{C} + A \cdot \bar{D} \cdot \bar{\lambda} + B \cdot \bar{C} \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha \cdot |C|^2 + 2 \cdot \operatorname{Re}(C \cdot \bar{D} \cdot \bar{\lambda})}; \quad (4)$$

$$\rho = \left| \frac{A}{C} - \omega_0 \right| = \left| \frac{(A \cdot D - B \cdot C) \cdot \lambda}{2 \cdot \alpha \cdot |C|^2 + 2 \cdot \operatorname{Re}(C \cdot \bar{D} \cdot \bar{\lambda})} \right|, \quad (5)$$

где  $\lambda, \alpha$  – коэффициенты прямой;

$\bar{C}, \bar{D}, \bar{\lambda}$  – сопряженные комплексные величины.

Использование аппарата конформных отображений позволяет визуализировать появление постепенных и внезапных отказов элементов исследуемой схемы при изменении ее параметров [8, 9], например:

- снижение сопротивления изоляции устройств подключения обмоток;
- снижение сопротивления изоляции трансформатора;
- изменение коэффициента трансформации;
- появление переходного сопротивления в различных местах схемы.

В качестве примера рассмотрим изменение области входного сопротивления эквивалентного ЧП линейного трансформатора марки ОМ-1,2/10:

при понижении сопротивления изоляции ( $R_{и1}$ ) в устройствах подключения линии электропитания (рисунок 4);

при понижении сопротивления изоляции ( $R_{и2}$ ) в устройствах подключения нагрузки (рисунок 5).

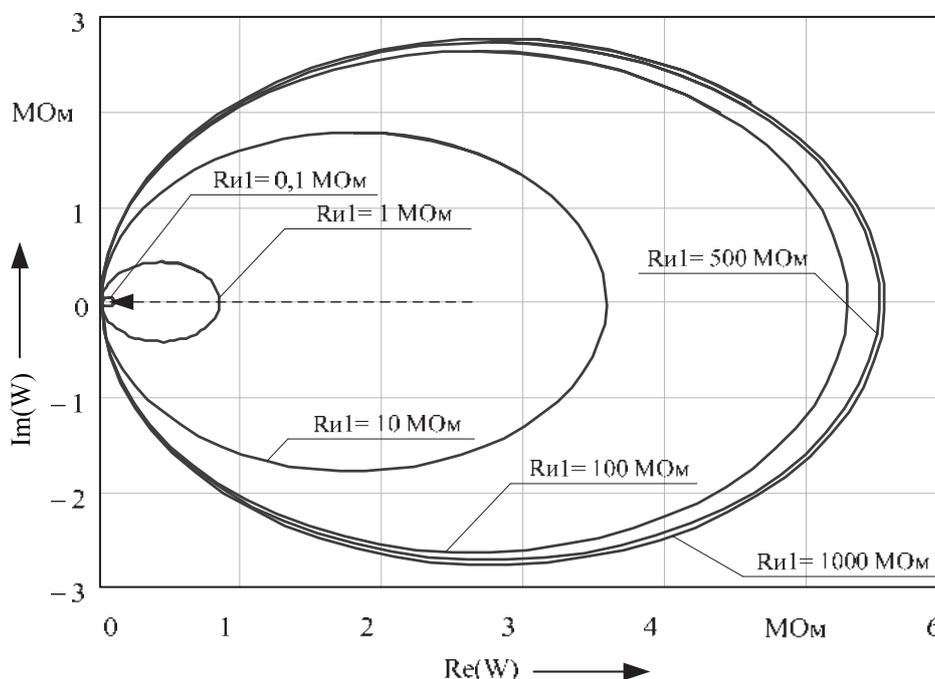


Рисунок 4 – Изменение области входного сопротивления эквивалентного ЧП линейного трансформатора при снижении сопротивления изоляции в устройствах подключения линии электропитания

В работе [4] в общем виде показана возможность применения аппарата конформных отображений для комплекта устройств, состоящего из электротехнических элементов (в том числе линейного трансформатора) в случае изменения одного из параметров схемы замеще-

ния. Оценим поведение области входного сопротивления эквивалентного четырехполюсника при сочетании изменения двух параметров:

при появлении переходного сопротивления ( $R_{пх}$ ) в устройствах подключения нагрузки (рисунок 6) и  $R_{и1}=1000 \text{ МОм}$ ;

при появлении переходного сопротивления ( $R_{пх}$ ) в устройствах подключения нагрузки (рисунок 7) и  $R_{и1}=1 \text{ МОм}$ .

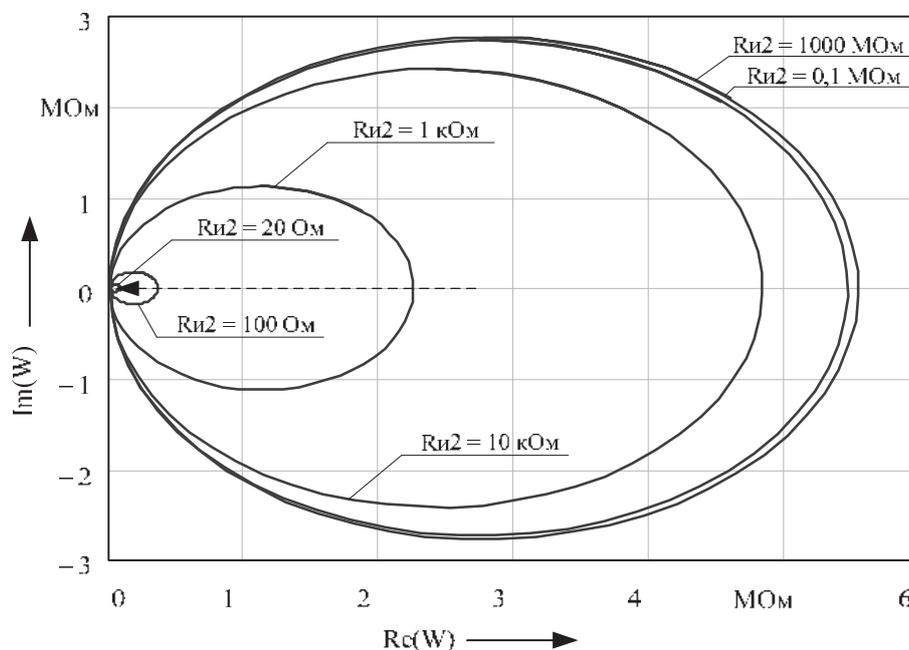


Рисунок 5 – Изменение области входного сопротивления эквивалентного ЧП линейного трансформатора при снижении сопротивления изоляции в устройствах подключения нагрузки

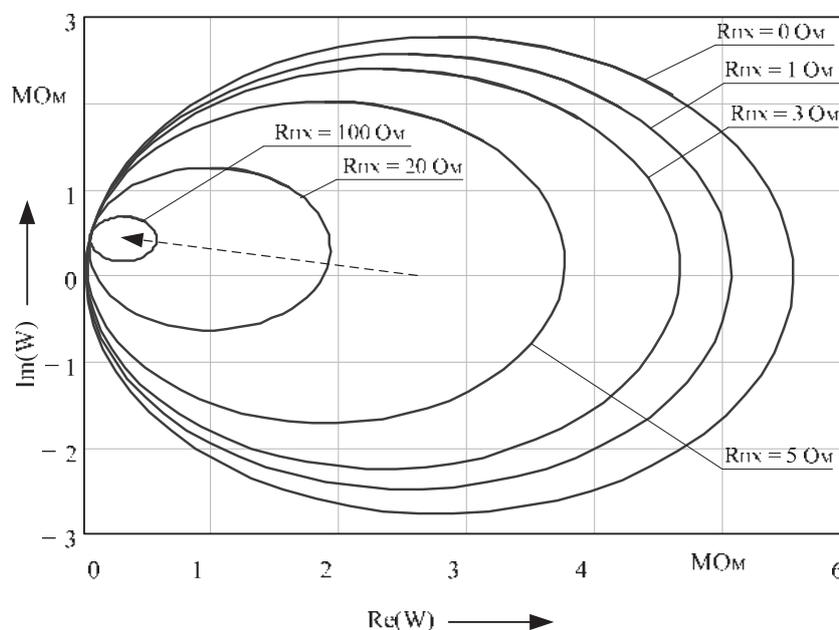


Рисунок 6 – Изменение области входного сопротивления эквивалентного ЧП линейного трансформатора при появлении переходного сопротивления в устройствах подключения нагрузки ( $R_{и1} = 1000 \text{ МОм}$ )

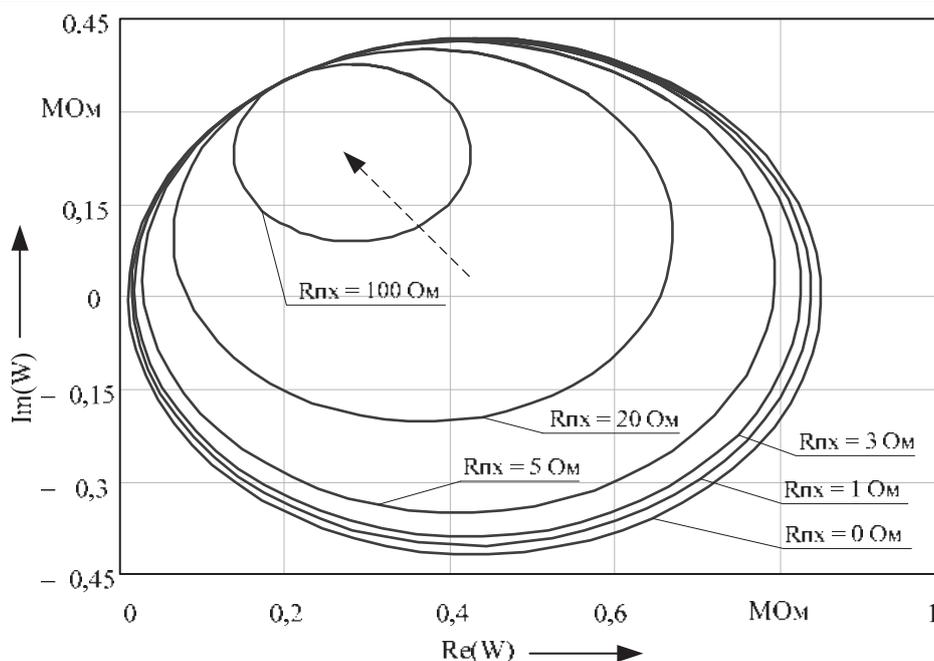


Рисунок 7 – Изменение области входного сопротивления эквивалентного ЧП линейного трансформатора при появлении переходного сопротивления в устройствах подключения нагрузки ( $R_{i1} = 1 \text{ МОм}$ )

Проведенный анализ полученных областей позволил сделать следующие выводы.

1. При снижении сопротивления изоляции в устройствах подключения линии электропитания (см. рисунок 4) область значений входного сопротивления сужается и смещается в сторону уменьшения активного сопротивления вплоть до нуля (короткое замыкание первичной обмотки).

2. При снижении сопротивления изоляции в устройствах подключения нагрузки до значений  $0,1 \text{ МОм}$  (см. рисунок 5) область значений входного сопротивления изменяется незначительно, при дальнейшем снижении сопротивления изоляции она сужается и смещается в сторону уменьшения активного сопротивления вплоть до значения эквивалентного сопротивления трансформатора в режиме короткого замыкания.

3. По мере увеличения переходного сопротивления в устройствах подключения нагрузки (см. рисунки 6 и 7) область, полученная при конформном преобразовании, сужается и смещается в сторону уменьшения активного и увеличения индуктивного сопротивления и стремится к точке эквивалентного сопротивления трансформатора в режиме холостого хода.

4. При изменении значений внутренних параметров схемы замещения происходит не только сужение или расширение области входного сопротивления, но и ее вращение (см. рисунки 6 и 7).

Для оценки состояния линейного трансформатора с применением номограмм необходимы реальные значения А-параметров четырехполюсника исследуемой схемы в условиях эксплуатации или ремонтного участка. В свою очередь для расчета значений А-параметров четырехполюсника необходимы значения токов и напряжений на входе и выходе схемы [6]. Таким образом, для организации системы мониторинга текущего состояния линейного трансформатора необходимо обеспечить измерение и передачу в центр мониторинга значений  $I_1, U_1, I_2, U_2$  (см. рисунок 1). На основании полученных значений возможно построение номограммы области входного сопротивления линейного трансформатора в режиме реального времени, а по динамике изменения этой области возможно определение причины отклонения параметров от нормативных значений.

В условиях ремонтного участка для определения состояния трансформатора необходимо подключить к его вторичной обмотке нагрузку, эквивалентную номинальной, и подать на первичную обмотку номинальное напряжение. Измерив значения токов и напряжений на

входе и выходе схемы, можно построить номограмму входного сопротивления трансформатора. Сравнив полученную окружность с аналогичной номограммой эталонного трансформатора, можно сделать заключение о возможных повреждениях, тем самым сократить время поиска причины и устранения повреждения.

Обработка результатов измерения, построение соответствующих номограмм и процесс выдачи предварительного заключения по состоянию трансформатора, безусловно, должны быть автоматизированы и не должны требовать привлечения персонала.

Конкретные технические решения по организации системы измерения, передачи и обработки данных требуют отдельного рассмотрения.

Номограммы могут быть использованы при мониторинге текущего состояния электрооборудования в условиях эксплуатации или для определения места повреждения в условиях ремонтно-ревизионного участка (РРУ) или мастерских и в целом могут позволить перейти от планового ремонта к обслуживанию по состоянию.

Графическое представление позволяет оценить влияние параметров каждого элемента линейного трансформатора на результат конформного отображения правой полуплоскости выходных значений на область входных значений и могут быть использованы при мониторинге текущего состояния трансформатора в условиях эксплуатации или для определения места повреждения в условиях РРУ. Например, постепенное сужение области входного сопротивления и смещение ее центра влево по оси абсцисс может служить признаком снижения сопротивления изоляции в устройствах подключения линии электроснабжения. В то же время существуют повреждения, которые будут слабо различимы предлагаемым способом, что требует дальнейшего исследования.

### *Список литературы*

1. Правила устройства электроустановок [Текст]. – СПб: Деан, 2003. – 928 с.
2. Волков, Е. А. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] / Е. А. Волков, Э. И. Санковский, Д. Ю. Сидорович. – М.: Маршрут, 2005. – 507 с.
3. Соколов, М. М. Контроль состояния системы электроснабжения устройств железнодорожной автоматики: Монография [Текст] / М. М. Соколов // Lambert Academic Publishing. – Саарбрюккен, 2012. – 161 с.
4. Лунев, С. А. Контроль технического состояния элементов системы электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог [Текст] / С. А. Лунев, Р. Ш. Аюпов, М. М. Соколов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск, 2010. – № 1. – С. 254 – 257.
5. Лаврентьев, М. А. Методы теории функций комплексного переменного [Текст] / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Лань, 2002. – 688 с.
6. Аюпов Р. Ш. Синтез системы пропуска обратного тягового тока в электротехническом комплексе электроснабжения железных дорог: Автореферат дис... канд. техн. наук [Текст] / Р. Ш. Аюпов / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. – 19 с.
7. Аюпов, Р. Ш. Анализ рельсовых цепей с использованием аппарата конформных отображений в системе Matlab [Текст] / Р. Ш. Аюпов // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта: Сб. науч. статей аспирантов и студентов университета / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2007. – Вып. 8. – С. 7 – 13.
8. Соколов М. М. Совершенствование методов контроля состояния электротехнического комплекса электроснабжения устройств автоматики электрифицированных железных дорог: Автореферат дис... канд. тех. наук [Текст] / М. М. Соколов / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 19 с.
9. Соколов, М. М. Контроль технического состояния линии электроснабжения устройств железнодорожной автоматики [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 3 (11). – С. 88 – 95.

## References

1. *Pravila ustrojstva jelektroustanovok* (Rules for the installation of electrical installations). Sankt-Peterburg: Dean, 2003, 928 p.
2. Volkov E. A., Sankovskij Je. I., Sidorovich D. Ju. *Teorija linejnyh jelektricheskikh cepej zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemehaniki i svjaz* (Theory of linear electric circuits of railway automatics, telemechanics and communications). Moscow, 2005, 507 p.
3. Sokolov M. M. *Kontrol' sostojanija sistemy jelektronsabzhenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki* (Monitoring the state of the power supply system for railway automation devices). Saarbrücken, 2012, 161 p.
3. Sokolov M. M. *Jelektropitanie ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki. Chast' I* (Power supply devices for railway automation and telemechanics. Part 1). Omsk, 2017, 34 p.
4. Lunev S. A., Ajupov R. Sh. Sokolov M. M. Control of the technical condition of the elements of the electricity supply system for non-railway consumers of railways [Kontrol' tehničeskogo sostojanija jelementov sistemy jelektronsabzhenija netjagovyh potrebitelej zheleznyh dorog]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2010, no 1, 254 – 257 pp.
5. Lavrent'ev M. A., Shabat B. V. *Metody teorii funkcij kompleksnogo peremennogo* (Methods of the theory of functions of a complex variable). Moscow: Lan, 2002, 688 p.
6. Ajupov R. Sh. *Sintez sistemy propuska obratnogo tjavovogo toka v jelektrotehnicheskom komplekse jelektronsabzhenija zheleznyh dorog* (Synthesis of reverse traction current transmission system in the electrical power complex of railroad power supply). Omsk, 2009, 19 p.
7. Ajupov R. Sh. *Analiz rel'sovyh cepej s ispol'zovaniem apparata konformnyh otobrazhenij v sisteme Matlab* (Analysis of the rail circuits using the conformal mapping apparatus in the Matlab system). Omsk, 2007, vol. 8, 7 – 13 pp.
8. Sokolov M. M. *Sovershenstvovanie metodov kontrolja sostojanija jelektrotehnicheskogo kompleksa jelektronsabzhenija ustrojstv avtomatiki jelektrificirovannyh zheleznyh dorog* (Perfection of methods for monitoring the state of the electrical power complex for electrified automation devices of electrified railways). Omsk, 2010, 163 p.
9. Sokolov M. M. Monitoring the technical condition of the power supply line for railway automation devices (Kontrol' tehničeskogo sostojanija linii jelektronsabzhenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki) *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 3 (11), 88 – 95 pp.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +8 (3812) 311872.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sokolov Maxim Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: SokolovMM@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Визуализация изменения параметров линейных трансформаторов в системах железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 130 – 137.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M. Displaying the changing linear transformers parameters in the systems of rail automatics and telemechanics. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 130 – 137 (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](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### **В редакцию журнала представляется:**

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc; экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (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), аффилиацию 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), аффилиацию 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, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовки *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 1 (29) 2017

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 № ФС77-66605 от 21 июля 2016 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 – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 27.04.2017.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 28.04.2017.

