

научно-технический

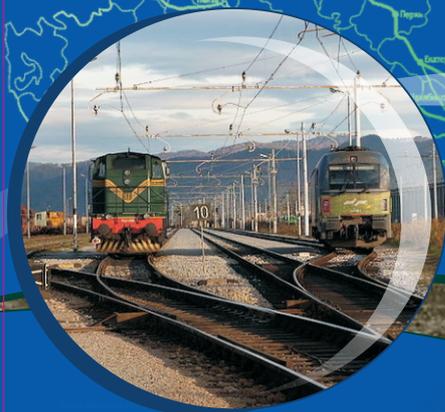
ISSN 2220-4245  
журнал

# ИЗВЕСТИЯ

№ 3(19)

2014

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

## EDITORIAL BOARD

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог

- Блинов П. Н., Блинов А. П. Применение математической модели процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей для многовариантных расчетов ..... 2
- Елисеев С. В., Артюнин А. И., Каимов Е. В. Теоретические основы динамических взаимодействий в колебательных системах с кинематическими парами поступательного типа ..... 7
- Кондратенко Е. В. Оценка возможности использования теплового метода контроля герметичности котла железнодорожной цистерны ..... 18
- Новачук Я. А., Никитин Д. Н., Коблов Р. В., Тепляков А. Н. Новая парадигма кинематики «колесо – рельс» ..... 24
- Овчаренко С. М., Минаков В. А. Моделирование процесса накопления продуктов износа в моторном масле тепловозного дизеля Д49 ..... 31
- Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Гришина Ю. Б. Технично-экономическое обоснование применения смесевых видов топлива в тепловозных дизелях ..... 36
- Харламов В. В., Шкодун П. К., Долгова А. В., Хлопцов А. С. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава ..... 44

### Транспортная энергетика

- Бакланов А. А., Есин Н. В., Гателюк О. В. Изменение алгоритма работы выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза ВЛ85 на высших зонах регулирования ..... 50
- Вильгельм А. С., Комяков А. А., Незевак В. Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока ..... 54
- Закарокин В. П., Крюков А. В., Черепанов А. В. Управление качеством электроэнергии в системах тягового электроснабжения на основе технологий интеллектуальных сетей ..... 65
- Москалев Ю. В. Определение оптимальной энергоемкости и мощности накопителя энергии для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей ..... 75
- Пустьозов М. Ю. Использование компьютерной модели однофазного трансформатора с дополнительным выводом в средней точке вторичной обмотки для исследования системы стабилизации тока в обмотке возбуждения тягового электродвигателя ..... 81
- Черемисин В. Т., Пашков Д. В., Ушаков С. Ю. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» ..... 87

### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Морозов А. В., Шахов В. Г. Анализ безопасности доступа беспроводных сетей по технологии WI-FI, применяемой в объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта ..... 92

### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Белов А. А., Ларин А. Н. Модель группировки объектов подвижного состава ..... 96
- Лунев С. А., Сероштанов С. С., Соколов М. М. Непрерывный контроль координаты перемещения отцепов в подгорочных парках сортировочных горок ..... 104
- Псеровская Е. Д., Хорунжин С. Ю. О влиянии условий размещения груза на безопасность движения поездов и стоимость перевозки ..... 109
- Червотенко Е. Э., Калинина А. Р. Особенности развития технических станций транзитных железнодорожных узлов Дальнего Востока ..... 114

### Организация производства на транспорте

- Сидорова Е. А., Давыдов А. И., Вялкова С. О. Методология прогнозирования объемов перевозочной работы на основе построения временных трендов ..... 119

### АННОТАЦИИ ..... 127

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: Омский государственный университет путей сообщения

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

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

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРОЙ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ДЛЯ МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ

*В статье рассматривается расчет влияния параметров топливной аппаратуры дизелей на характер изменения и величину подачи топлива при впрыске. Представлена реализация математической модели процесса топливоподачи, которую необходимо использовать при формировании комплектов перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей, используемых при обкатке топливных насосов высокого давления на стендах с целью приближения условий работы на стенде к реальным условиям работы на дизеле и правильного определения производительности насосов на стенде.*

Одной из основных задач расчета процесса подачи топлива комплектом топливной аппаратуры (ТА) является определение действительного количества топлива, подаваемого за цикл. В этом случае уравнения топливоподачи должны быть уравнениями баланса, учитывающими в рассматриваемом сечении линии высокого давления поступление и расход топлива. Поэтому процесс подачи топлива должен описываться системой уравнений, позволяющей получить значения давления топлива в характерных точках тракта. К таким точкам следует отнести надплунжерную полость топливного насоса высокого давления (ТНВД) (давление  $P_n$ ), штуцер ТНВД, т. е. полость перед нагнетательным трубопроводом (давление  $P_{шт}$ ), входную полость форсунки (давление  $P_\phi$ ).

В общем случае давление в этих сечениях, а также количество впрыснутого в цилиндр топлива к расчетному углу поворота коленчатого вала могут быть определены с помощью системы уравнений [1]:

$$\begin{cases} P_n = P_{n1} + \Delta P(h_{пл}) - \Delta P(Y) - \Delta P(Q_{кл}) - \Delta P(Q_{ов}) - \Delta P(Q_{ун}); \\ P_{шт} = P_{шт1} + \Delta P(Y) + \Delta P(Q_{кл}) - \Delta P(Q_{тр}); \\ P_\phi = P_{\phi1} + \Delta P(Q_{тр}) - \Delta P(Z) - \Delta P(Q_{ц}); \\ g_{ц} = g_{ц1} + \Delta g_{ц}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_n, P_{шт}, P_\phi$  – давление топлива в надплунжерной полости, штуцере ТНВД и в камере распылителя форсунки у иглы соответственно, Па;

$P_{n1}, P_{шт1}, P_{\phi1}$  – то же давление на предыдущем шаге расчета, Па;

$\Delta P(h_{пл}), \Delta P(Y), \Delta P(Q_{кл}), \Delta P(Q_{ов}), \Delta P(Q_{ун}), \Delta P(Q_{тр}), \Delta P(Q_{ц}), \Delta P(Z)$  – прирост давления от перемещения плунжера, перемещения нагнетательного клапана, перетекания топлива через нагнетательный клапан, перетекания топлива в отсечное отверстие, утечки топлива по плунжерной паре, перетекания топлива через нагнетательный трубопровод, перетекания топлива в цилиндр и от перемещения иглы форсунки за период поворота коленчатого вала на угол  $\Delta\varphi$ , Па;

$g_{ц}, g_{ц1}$  – количество впрыснутого в цилиндр топлива к концу и началу текущего расчетного интервала, кг;

$\Delta g_{ц}$  – количество впрыснутого топлива за время расчетного интервала, кг.

Система уравнений (1) может быть упрощенно представлена в виде системы из трех уравнений. В этом случае первые два уравнения системы (1) заменяются одним, давление в штуцере ТНВД  $P_{шт}$  не определяется, а считается, что на входе нагнетательного трубопровода действует давление  $P_n$ . Участок линии высокого давления, состоящий из нагнетательного клапана и нагнетательного трубопровода, представляется в виде единого элемента – канала,

который имеет меняющееся эффективное проходное сечение  $\mu f_{\text{кан}}$ . До начала открытия нагнетательного клапана эффективное проходное сечение канала принимается  $\mu f_{\text{кан}} = 0$ , в начальный период открытия нагнетательного клапана, когда его эффективное проходное сечение  $\mu f_{\text{кл}}$  меньше эффективного проходного сечения нагнетательного трубопровода  $\mu f_{\text{тр}}$ , эффективное проходное сечение канала принимается  $\mu f_{\text{кан}} = \mu f_{\text{кл}}$ , в последующий период открытия нагнетательного клапана, когда его эффективное проходное сечение  $\mu f_{\text{кл}}$  становится больше эффективного проходного сечения нагнетательного трубопровода  $\mu f_{\text{тр}}$ , эффективное проходное сечение канала принимается  $\mu f_{\text{кан}} = \mu f_{\text{тр}}$ .

Тогда система уравнений топливоподачи примет вид:

$$\begin{cases} P_{\text{н}} = P_{\text{н1}} + \Delta P(h_{\text{пл}}) - \Delta P(Q_{\text{кан}}) - \Delta P(Q_{\text{ов}}) - \Delta P(Q_{\text{ун}}); \\ P_{\text{ф}} = P_{\text{ф1}} + \Delta P(Q_{\text{кан}}) - \Delta P(Z) - \Delta P(Q_{\text{ц}}); \\ g_{\text{ц}} = g_{\text{ц1}} + \Delta g_{\text{ц}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta P(Q_{\text{кан}})$  – прирост давления от перетекания топлива через канал, Па.

Давление нагнетания  $P_{\text{н}}$  определится по уравнению:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{н1}} + \frac{f_{\text{п}}(h - h_1)}{\alpha_{\text{н}} V_{\text{н}}} - \frac{b \Delta t \mu f_{\text{кан}}}{\alpha_{\text{н}} V_{\text{н}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\text{н}} - P_{\text{ф}}|} - \frac{c \Delta t \mu f_{\text{ов}}}{\alpha_{\text{н}} V_{\text{н}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\text{н}} - P_{\text{в}}|} - \frac{Q_{\text{ун}} \Delta t}{\alpha_{\text{н}} V_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где  $f_{\text{п}}$  – площадь поперечного сечения плунжера, м<sup>2</sup>;

$h, h_1$  – ход плунжера на текущем и предыдущем шаге расчета, м;

$\alpha_{\text{н}}$  – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении  $P_{\text{н}}$ , Па<sup>-1</sup>;

$V_{\text{н}}$  – средний объем надплунжерной полости, м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – расчетный интервал, с;

$\rho$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu f_{\text{ов}}$  – эффективное проходное сечение нагнетательного (отсечного) отверстия, м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{ун}}$  – утечка топлива по зазорам в плунжерной паре, м<sup>3</sup>/с;

$b, c$  – коэффициенты, учитывающие направление движения топлива;

$P_{\text{в}}$  – давление топлива во всасывающей (отсечной) полости, Па.

Давление топлива во входной полости форсунки

$$P_{\text{ф}} = P_{\text{ф1}} + \frac{b \Delta t \mu f_{\text{кан}}}{\alpha_{\text{ф}} V_{\text{ф}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\text{н}} - P_{\text{ф}}|} - \frac{\Delta t \mu f_{\text{ф}}}{\alpha_{\text{ф}} V_{\text{ф}}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\text{ф}} - P_{\text{ц}}|}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{ф}}$  – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении  $P_{\text{ф}}$ , Па<sup>-1</sup>;

$V_{\text{ф}}$  – средний объем полости форсунки, м<sup>3</sup>;

$\mu f_{\text{ф}}$  – эффективное проходное сечение форсунки, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{ц}}$  – давление газов в цилиндре дизеля, Па.

Уравнения (3) и (4) могут быть решены приближенным методом с итерацией [2]. В качестве первого приближения принимается разность:

$$(P_{\text{н}} - P_{\text{ф}})_1^{(\text{зад})} = 2(P_{\text{н1}} - P_{\text{ф1}}) - (P_{\text{н2}} - P_{\text{ф2}}), \quad (5)$$

где  $(P_{\text{н}} - P_{\text{ф}})_1^{(\text{зад})}$  – задаваемая разность давлений на  $(i + 1)$ -м шаге расчета;

$(P_{\text{н1}} - P_{\text{ф1}})$  – рассчитанная разность давлений на  $i$ -м шаге расчета;

$(P_{\text{н2}} - P_{\text{ф2}})$  – рассчитанная разность давлений на  $(i - 1)$ -м шаге расчета.

Подстановкой разницы (5) в уравнение (3) определяется промежуточное значение  $P_{\text{н}}^{(n)}$ .

Для определения промежуточного значения давления  $P_{\text{ф}}^{(n)}$  в уравнение (4) подставляется значение  $P_{\text{н}}^{(n)}$  вместо  $P_{\text{н}}$ , а вместо  $P_{\text{ф}}$  – разность  $P_{\text{н}}^{(n)} - (P_{\text{н}} - P_{\text{ф}})_1^{(\text{зад})}$ .

В результате получается новое значение разности давлений в полостях  $V_n$  и  $V_\phi$ :

$$(P_n - P_\phi)_1^{(p)} = P_n^{(n)} - P_\phi^{(n)}. \quad (6)$$

В качестве второго приближения принимается условие:

$$(P_n - P_\phi)_2^{(зад)} = 0,5[(P_n - P_\phi)_1^{(зад)} + (P_n - P_\phi)_1^{(p)}]. \quad (7)$$

С учетом разности (7) рассчитывается вторая разность промежуточных значений давлений:

$$(P_n - P_\phi)_2^{(p)} = P_n^{(n)} - P_\phi^{(n)}. \quad (8)$$

Третье и все последующие приближения:

$$(P_n - P_\phi)_3^{(зад)} = \frac{(P_n - P_\phi)_2^{(зад)}(P_n - P_\phi)_1^{(p)} - (P_n - P_\phi)_2^{(p)}(P_n - P_\phi)_1^{(зад)}}{(P_n - P_\phi)_2^{(зад)} + (P_n - P_\phi)_1^{(p)} - (P_n - P_\phi)_2^{(p)} - (P_n - P_\phi)_1^{(зад)}}. \quad (9)$$

Подстановкой этой разности в уравнения (3) и (4) определяются новые значения  $P_n^{(n)}$  и  $P_\phi^{(n)}$ , а следовательно, и разность  $(P_n - P_\phi)_3^{(p)}$ . Сравнив принятую разность  $(P_n - P_\phi)_3^{(зад)}$  с полученной  $(P_n - P_\phi)_3^{(p)}$ , вычисляем:

$$\delta = |(P_n - P_\phi)_3^{(p)} - (P_n - P_\phi)_3^{(зад)}| - E_p, \quad (10)$$

где  $E_p$  – принятая погрешность расчета, Па.

Решение будет найдено, если  $\delta \leq 0$ .

После определения  $P_n$  и  $P_\phi$  рассчитывается количество впрыснутого в цилиндр топлива по уравнению [1]:

$$g_{ц} = g_{ц1} + \Delta t \rho \mu f_\phi \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{|P_\phi K - P_{ц}|}}, \quad (11)$$

где  $K$  – коэффициент потери давления в трубопроводе, учитывающий гидравлические сопротивления, связанные с конечной длиной трубопровода.

Коэффициент потери давления  $K$  в трубопроводе вычисляется по выражению [1]:

$$K = C_2 \frac{\mu f_{тр}}{f_{тр}}, \quad (12)$$

где  $C_2$  – постоянная для данного типа ТА;

$f_{тр}$  – среднее фактическое значение площади проходного сечения трубопровода, м<sup>2</sup>.

Значение  $C_2$  может быть определено с помощью стенда постоянного напора [3]. Для этого измеряется время истечения при определенном давлении заданного количества топлива через нагнетательный трубопровод  $t_{тр}$ , а затем через дроссельную шайбу  $t_{ш}$  с площадью проходного сечения, равной среднему значению проходного сечения трубопровода (для дроссельной шайбы  $l = 0$ ).

Постоянная

$$C_2 = \frac{t_{тр}}{t_{ш}}. \quad (13)$$

В расчетные уравнения модели входят следующие характеристики топлива: плотность  $\rho$ , средний коэффициент сжимаемости  $\alpha_{ср}$  и кинематическая вязкость  $\nu$ , которые зависят от

температуры  $T$  и давления  $P$  топлива, причем температура топлива в процессе впрыскивания принимается усредненной за весь период впрыскивания.

Значения характеристик топлива вычисляются по формулам [4]:

$$\rho = \frac{\rho_{20} - [0,71 - 0,001345(\rho_{20} - 850)](T - 293)}{1 - Pk_{\alpha}}; \quad (14)$$

$$\nu = \nu_0 (0,9789 + 0,29 \cdot 10^{-4} \rho_{20})^{P/9,8110^4}; \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{сп}} = \frac{k_{\alpha}}{1 + Pk_{\alpha}}, \quad (16)$$

где  $\rho_{20}$  – плотность топлива при 293 К, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu_0$  – вязкость топлива при атмосферном давлении, м<sup>2</sup>/с;

$$k_{\alpha} = a_0 + \frac{a_1}{2} P + \frac{a_2}{3} P^2; \quad a_0 = f_0(\rho_{20})\varphi_0(T); \quad a_1 = f_1(\rho_{20})\varphi_1(T); \quad a_2 = f_2(\rho_{20})\varphi_2(T);$$

$$f_0(\rho_{20}) = [83 - 0,238(\rho_{20} - 850) + 0,572 \cdot 10^{-3}(\rho_{20} - 850)^2] \cdot 10^{-11};$$

$$\varphi_0(T) = 0,85 + 0,329 \cdot 10^{-2}(T - 293) + 0,1157 \cdot 10^{-4}(T - 293)^2;$$

$$f_1(\rho_{20}) = [-82,2 + 0,442(\rho_{20} - 850) - 1,43 \cdot 10^{-3}(\rho_{20} - 850)^2] \cdot 10^{-19};$$

$$\varphi_1(T) = 0,825 + 0,1 \cdot 10^{-2}(T - 293) + 0,835 \cdot 10^{-4}(T - 293)^2;$$

$$f_2(\rho_{20}) = [54,2 - 0,342(\rho_{20} - 850) + 1,408 \cdot 10^{-3}(\rho_{20} - 850)^2] \cdot 10^{-27};$$

$$\varphi_2(T) = 0,8 + 0,5 \cdot 10^{-2}(T - 293) \quad \text{при } T = 293 - 333 \text{ К};$$

$$\varphi_2(T) = 1 + 0,237 \cdot 10^{-3}(T - 333)^2 \quad \text{при } T = 333 - 433 \text{ К}.$$

Перемещение плунжера ТНВД в зависимости от угла поворота кулачкового вала определяется по кривой его скорости  $h = f(C)$ . При характерном для тепловозных дизелей линейном законе изменения скорости плунжера его ход определяется [4] по выражению:

$$h = h_{\text{н}} + \frac{C_i(\varphi - \varphi_{\text{н}})}{6n} + \frac{(C_{i+1} - C_i)(\varphi - \varphi_{\text{н}})^2}{12n\varphi_i}, \quad (17)$$

где  $h_{\text{н}}$  и  $\varphi_{\text{н}}$  – ход плунжера и угол поворота кулачкового вала, соответствующие началу расчетного участка кривой скорости плунжера;

$C_i$  – скорость плунжера в узловых точках кривой  $h = f(C)$ , м/с;

$\varphi$  – расчетный угол поворота кулачкового вала, град;

$n$  – частота вращения кулачкового вала, при которой построена кривая  $h = f(C)$ , мин<sup>-1</sup>;

$\varphi_i$  – угол поворота кулачкового вала, соответствующий рассматриваемому участку кривой скорости плунжера, град.

Площадь проходного сечения отсечного (наполнительного) отверстия при ходе плунжера  $(h - h_0) \sin \beta > r$

$$f_0 = \pi r^2 - \left[ r^2 \arccos \frac{(h - h_0) \sin \beta - r}{r} - r((h - h_0) \sin \beta - r) \sqrt{1 - \left( \frac{(h - h_0) \sin \beta - r}{r} \right)^2} \right], \quad (18)$$

а при ходе плунжера  $(h - h_0) \sin \beta \leq r$

$$f_0 = r^2 \arccos \frac{r - (h - h_0) \sin \beta}{r} - r(r - (h - h_0) \sin \beta) \sqrt{1 - \left( \frac{r - (h - h_0) \sin \beta}{r} \right)^2}, \quad (19)$$

где  $h_0$  – ход плунжера, соответствующий началу отсечки подачи топлива, м;

$\beta$  – угол наклона кромки плунжера к его оси, град;

$r$  – радиус наполнительного (отсечного) отверстия, м.

Утечка топлива через зазоры в плунжерной паре рассчитывается по выражению [4]:

$$Q_{yh} = \frac{0,036 d_n (\delta_n + 0,652 \cdot 10^{-13} P_{n1})^3 P_{n1}}{\nu \rho_n}, \quad (20)$$

где  $d_n$  – диаметр плунжера, м;

$\delta_n$  – диаметральный зазор в плунжерной паре, м;

$l_n$  – длина компрессионной части плунжера, м.

Таким образом, математическая модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей может быть реализована в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} P_n = P_{n1} + \frac{f_n (h - h_1)}{\alpha_n V_n} - \frac{b \Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_\phi|} - \frac{c \Delta t \mu f_{об}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_b|} - \frac{Q_{yh} \Delta t}{\alpha_n V_n}; \\ P_\phi = P_{\phi 1} + \frac{b \Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_\phi V_\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_\phi|} - \frac{\Delta t \mu f_\phi}{\alpha_\phi V_\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\phi - P_c|}; \\ g_c = g_{c1} + \Delta t \rho \mu f_\phi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\phi K - P_c|}. \end{cases} \quad (21)$$

Результаты расчета по представленной методике могут быть использованы для определения влияния исследуемых факторов на основные выходные характеристики комплектов топливной аппаратуры, такие как фактический угол опережения впрыска топлива, продолжительность впрыска и производительность комплекта топливной аппаратуры.

Представленная математическая модель процесса топливоподачи может быть полезна для расчета параметров топливной аппаратуры при проведении модернизации дизелей, при формировании комплектов ТА перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей ТА, используемых при обкатке ТНВД на стендах, применяемых в настоящее время в локомотивных депо.

Использование предложенной модели для модернизации указанных стендов позволит создать условия работы ТНВД на стендах, адекватные условиям работы на дизеле, и правильно определять производительность ТНВД на стендах.

### Список литературы

1. Блинов, П. Н. Математическая модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – № 1 (9). – С. 2 – 7.
2. Копченова, Н. В. Вычислительная математика в примерах и расчетах [Текст] / Н. В. Копченова, И. А. Марон. – СПб: Лань, 2009. – 368 с.
3. Блинов, П. Н. Автоматизация стендовых испытаний топливной и регулирующей аппаратуры тепловозных дизелей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1). – С. 8 – 15.

4. Фомин, Ю. Я. Топливная аппаратура дизелей [Текст] / Ю. Я. Фомин, Г. В. Никонов, В. Г. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.

## References

1. Blinov P. N., Blinov A. P. Mathematical model of the process of fuel feed by locomotive diesel fuel [Matematicheskaya model' protsessa toplivopodachi toplivnoy apparatury teplovoznnykh dizeley]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 1 (9), pp. 2 – 7.

2. Kopchenova N. V., Maron I. A. *Vychislitel'naya matematika v primerakh i raschetakh* (Computational Mathematics in the examples and calculations). St. Peretburg: Lan' Publ., 2009, 368 p.

3. Blinov P. N., Blinov A. P. Automation of the bench tests of the fuel and regulated equipment of the diesels [Avtomatizatsiya stendovykh ispytaniy toplivnoy i reguliruyushchey apparatury teplovoznnykh dizeley]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 1 (1), pp. 8 – 15.

4. Fomin Yu. Ya., Nikonov G. V., Ivanovskiy V. G. *Toplivnaya apparatura dizeley* (Of diesel fuel equipment) Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982, 168 p.

УДК 62.752, 621.8.02

С. В. Елисеев, А. И. Артюнин, Е. В. Каимов

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА

*Предлагается метод построения математических моделей механических колебательных систем, включающих в свой состав механизмы с кинематическими парами скольжения. Показано, что введение механизмов может быть интерпретировано как введение в исходную модель дополнительных обратных связей, соответствующих в целом управлению по абсолютному ускорению и по абсолютному отклонению. Основой предлагаемой технологии построения математических моделей являются представления о том, что при наличии механизма или механической цепи иного вида силовые и кинематические возмущения формируют различные структуры динамических взаимодействий. Получены аналитические соотношения, определяющие динамические свойства систем. Рассмотрены особенности динамических свойств, проявляющиеся в различных формах динамических взаимодействий и частотных характеристик.*

Многие технические системы, в том числе робототехнические, отличаются разнообразием конструктивных форм взаимодействия элементов [1], в которых используются различные механизмы. Вопросы динамики механических колебательных систем с дополнительными связями нашли отражение в ряде работ [2, 3].

Введение механизмов в структуру механических колебательных систем приносит дополнительные связи, которые изменяют не только инерционные, но и упругие свойства системы в целом. Основная часть механической системы представляет собой базовую структуру, состоящую, если рассматриваются задачи вибрационной защиты (или подобные им задачи обеспечения определенного динамического состояния), из объекта защиты (или управления) и упругого элемента. В контексте с некоторым неподвижным базисом опорных поверхностей базовая система по существу может рассматриваться как самодостаточная структура минимальной сложности, обеспечивающей колебания относительно положения статического равновесия. Возможно усложнение базовой системы путем добавления других элементарных звеньев с диссипативными массоинерционными и упругими свойствами [4, 5]. Таким же образом могут интерпретироваться и особенности введения механизмов в структуру механических колебательных систем, создавая соответствующую систему пространственных дополнительных связей. Ряд вопросов, характерных для таких представлений, рассмотрен в работах [3 – 6].

Отметим, что введение механизмов как дополнительных связей приводит к необходимости учитывать взаимодействия массоинерционных элементов, объединяемых стержнями, что создает достаточно сложные формы взаимодействия элементов, при которых существенное значение приобретает вид внешнего воздействия [7, 8]. В этом плане можно отметить существование особенностей между внешними возмущениями, которые прикладываются непосредственно к объекту защиты (или управления) или воздействие осуществляется через опорную поверхность (кинематическое). Возможны варианты приложения внешних сил через промежуточные элементы. Проблемным вопросом является возможность приложения внешних воздействий в точках соединения между собой упругих и диссипативных элементов, в том числе и инерционно-массовых, если они относятся к числу так называемых дифференцирующих элементов второго порядка [5].

В предлагаемой статье развиваются теоретические основы представлений о динамических взаимодействиях типовых элементов виброзащитных систем с механизмами, входящими в их структуру при так называемом кинематическом возмущении. В данном случае рассматриваются гармонические воздействия со стороны опорной поверхности.

На рисунке 1 представлена расчетная схема виброзащитной системы, имеющей объект защиты  $m_0$  и опирающейся на пружину жесткостью  $k_0$ , что составляет базовый колебательный контур.

Вместе с тем используется дополнительный сдвоенный или симметричный механизм с поступательными кинематическими парами в т.  $B$ ,  $B'$ , в которых сосредоточена нагрузка в виде материальных точек массой  $m_1$ . На концах нижних рычагов в т.  $B_1$  и  $B'_1$  расположены дополнительные массы  $m_2$ . Кроме базовой пружины  $k$  имеются упругие элементы  $k_1$ , обеспечивающие упругие взаимодействия элементов вдоль нижнего рычага. Дополнительные массы  $m_2$  соединяются пружиной жесткостью  $k_2$ . Объект защиты совершает малые колебания относительно положения статического равновесия. Система обладает линейными свойствами, а силы сопротивления считаются пренебрежимо малыми.

Наличие поступательных кинематических пар предопределяет в т.  $B$  и  $B'$  возникновение кориолисовых ускорений, что связано с формированием дополнительных инерционных сил. В данном случае предполагается, что эти силы можно не учитывать в силу ограничений, накладываемых на базовую модель, отражающую свойства лишь плоского движения [9]. Предполагается, что нижний и верхний рычаги являются абсолютно жесткими и невесомыми. Кинетическая энергия системы определяется в первом приближении через абсолютные скорости движения массоинерционных элементов, формируемых суммой движений и объектом защиты.

Если на объект  $m_0$  действует силовое внешнее воздействие, например,  $Q(t)$ , как показано на рисунке 1, то объект защиты получает движение, описываемое координатой  $y$ : для описания движения используется система координат, связанная с неподвижным базисом.

Для получения необходимых параметров движения элементов системы может быть использована принципиальная кинематическая схема, как показано на рисунке 2, где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы наклона верхнего и нижнего рычагов,  $AB = AB' = l_1$ ,  $A_1B = A_1B' = l_2$ ,  $AB_1 = AB'_1 = l_3$ .

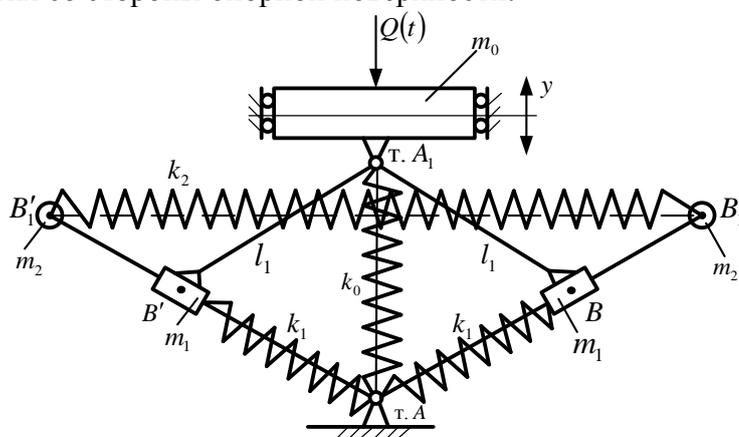


Рисунок 1 – Расчетная схема виброзащитной системы с динамическим гасителем, имеющим поступательные кинематические пары

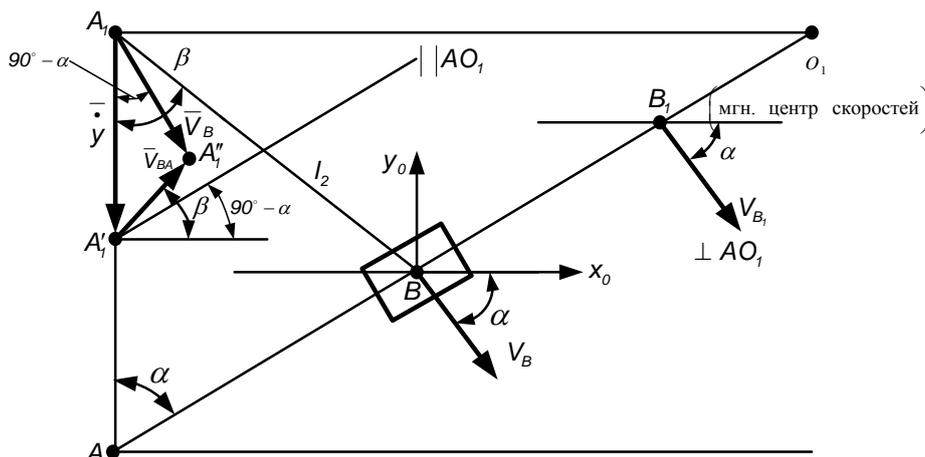


Рисунок 2 – Принципиальная схема для определения кинематических параметров при силовом возмущении

Используя схему, представленную на рисунке 2, найдем, что скорость точки  $B$  определяется по формуле:

$$V_B = \dot{y} \frac{i \cdot \cos \beta}{\sin \alpha (\cos \alpha + i \cdot \cos \beta)}, \quad (1)$$

где  $i = \frac{l_2}{l_1}$  – передаточное отношение рычажных связей.

Введем понятие о коэффициенте передачи скорости, используя выражение (1):

$$a = \frac{i \cdot \cos \beta}{\sin \alpha (\cos \alpha + i \cdot \cos \beta)}. \quad (2)$$

Скорость точки  $B_1$ , где сосредоточена дополнительная масса  $m_1$ , определяется так:

$$V_{B_1} = \dot{y} a \frac{(l_1 + l_3) \sin \alpha}{l_1 \sin \beta} = \dot{y} a \cdot i_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (3)$$

Обозначим выражением  $V_{B_1} = \dot{y} \cdot a'$ , где также используется понятие коэффициента передачи скорости:

$$a' = i_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (4)$$

В выражении (4) принимается, что  $i_1 = \frac{(l_1 + l_3)}{l_1}$ .

Смещение точки  $B_1$  в горизонтальном направлении, необходимое для определения деформации упругого элемента жесткостью  $k_2$ , может быть определено по уравнению:

$$\Delta_{B_1 B'_1} = y \cdot (aa') \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Смещение точки  $B$  (или  $B'$ ) по направлению  $AB$  определяет деформацию упругого элемента  $k_1$ . Такое смещение может быть найдено из треугольника  $\Delta A'_1 A_1 A''_1$  (см. рисунок 2). В этом случае смещение вдоль нижнего рычага

$$\delta_{AB} = \frac{ya \cdot \cos \alpha}{\cos \beta} \cos(\alpha + \beta - 90^\circ) = -ya \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \sin(\alpha + \beta). \quad (6)$$

Принимая во внимание знак « $\rightarrow$ » в выражении (6), отметим, что в зависимости от соотношения углов  $\alpha$  и  $\beta$  смещение точки В вдоль АО1 будет различным:

$$\delta_{AB} = \delta_{AO_1} = -ya_2, \quad (7)$$

где

$$a_2 = a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \sin(\alpha + \beta). \quad (8)$$

С использованием соотношений (7) и (8) выражение для потенциальной энергии запишется в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2}ky^2 + k_1(y \cdot a_2)^2 + k_2(y \cdot aa' \cdot \cos \alpha)^2. \quad (9)$$

Кинетическая энергия системы с учетом симметричного расположения дополнительных масс  $m_1$  и  $m_2$  определяется по уравнению:

$$T = \frac{1}{2}m_0 \cdot (\dot{y})^2 + m_1 \cdot (\dot{y})^2 \cdot a^2 + m_2 \cdot \dot{y} \cdot (aa')^2. \quad (10)$$

Уравнение движения системы при силовом возмущении примет вид (в изображениях по Лапласу):

$$\tilde{y} \left\{ \left[ m_0 + 2a^2(m_1 + m_2 \cdot (a')^2) \right] p^2 + k_0 + 2k_1 \cdot a_2^2 + 2k_2 \cdot (aa')^2 \cdot \cos^2 \alpha \right\} = \tilde{Q}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) можно определить передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{Q}} = \frac{1}{\left[ m_0 + 2a^2(m_1 + m_2 \cdot (a')^2) \right] p^2 + k_0 + 2k_1 \cdot a_2^2 + 2k_2 \cdot (aa')^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (12)$$

На рисунке 3 приведена расчетная схема системы, при этом переменная  $\tilde{y}$  и внешняя сила  $\tilde{Q}$  приведены в изображениях по Лапласу.

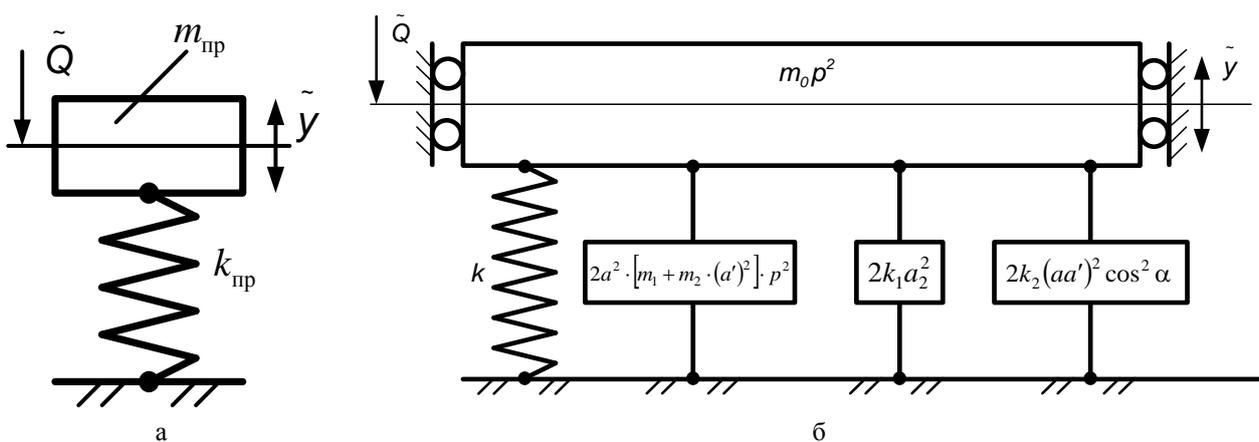


Рисунок 3 – Расчетная схема системы с учетом формирования дополнительных упругоинерционных приведенных характеристик: обобщенная (а) и детализованная (б) схемы

В данном случае жесткость пружин и массоинерционные свойства представляют собой операторные соотношения и отражают приведенные характеристики системы. Исходная система после такого преобразования представляет собой систему с одной степенью свободы.

При этом приведенная жесткость  $k_{пр}$  имеет три составляющих, две из которых формируются конфигурацией механизма:

$$k_{пр} = k_0 + 2k_1 \cdot \cos^2 \alpha + 2k_2 (aa' \cdot \cos \alpha)^2. \quad (13)$$

Из рисунка 3, а следует, что исходная механическая колебательная система в результате преобразований может быть сведена к системе с одной степенью свободы. Системы такого обобщенного вида могут быть названы базовыми [2] по аналогии с обычными расчетными схемами виброзащитных систем; при этом необходимо принять во внимание, что параметры системы записаны в операторной форме. Параметр  $k_{пр}$  отражает по своей физической сути свойства динамической жесткости всей системы при гармоническом силовом возмущении. На рисунке 3, б представлена развернутая, или детализированная, схема, на которой показано, что массоинерционные элементы  $m_1$  и  $m_2$  интерпретируются как звенья с передаточными функциями дифференцирующих структурных элементов второго порядка. То есть механизм в составе виброзащитной системы интерпретируется типовыми элементами структурной теории виброзащитных систем [2], а свойства механизма учитываются параметрами обобщенной пружины с жесткостью  $k_{пр}$ . Эта жесткость зависит от частоты внешнего воздействия и от параметров самого механизма. В этом смысле конфигурация механизма обладает настроенными функциями. Из анализа передаточной функции (12) можно сделать вывод о том, что система приобретает приведенную массу:

$$m_{пр} = m_0 + 2a^2 (m_1 + (a')^2 \cdot m_2). \quad (14)$$

С учетом  $k_{пр}$  и  $m_{пр}$  частота собственных колебаний в зависимости от конструктивно-технических особенностей системы определяется по формуле:

$$\omega_{соб}^2 = \frac{k_0 + 2k_1 \cos^2 \alpha + 2k_2 (aa')^2 \cdot \cos^2 \alpha}{m_0 + 2a^2 \cdot (m_1 + (a')^2 \cdot m_2)}. \quad (15)$$

На рисунке 4 приведена принципиальная схема для определения кинематических соотношений.

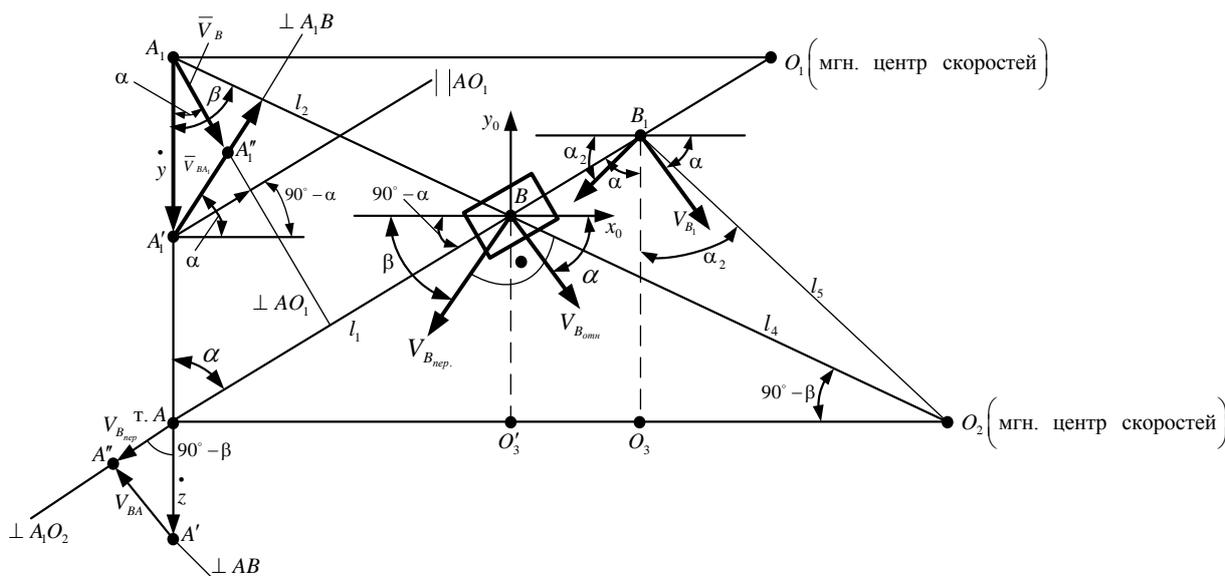


Рисунок 4 – Принципиальная схема кинематических соотношений системы при кинематическом возмущении

При рассмотрении кинематических воздействий ( $z(t) \neq 0, Q = 0$ ) используются мгновенные центры скоростей. Если при силовом возмущении опорная поверхность остается непод-

вижной, то при кинематическом воздействии элементы системы участвуют в сложном движении, создаваемом и объектом защиты, и движением основания.

Для определения проекций скоростей используется вспомогательная система координат  $y_0, x_0$ . Кинематические взаимодействия, в отличие от схемы, приведенной на рисунке 2, формируются движениями объекта защиты  $m_0$  (координата  $y$ ) и опорной поверхности  $-z(t)$ , что используется для определения скоростей точек с сосредоточенными массами  $m_0, m_1$  и  $m_2$  в сложном движении.

Кинетическая энергия системы, как и при силовом возмущении, определяется в первом приближении как сумма кинетических энергий трех материальных точек с массами  $m_0, m_1$  и  $m_2$  с учетом сложного характера движения, вызванного двумя видами внешних воздействий:

$$T = T_0 + T_1 + T_2, \quad (16)$$

где  $T_0 = \frac{1}{2} m_0 \left( \dot{y} \right)^2$  – кинетическая энергия объекта защиты массой  $m_0$ ;  $T_1$  – кинетическая энергия элементов  $m_1$ ;  $T_2$  – кинетическая энергия элементов  $m_2$ .

При кинематическом возмущении скорость точки  $B$  в абсолютном движении будет складываться из двух составляющих:

$$\bar{V}_B = \bar{V}_{B_{\text{отн}}} + \bar{V}_{B_{\text{пер}}}. \quad (17)$$

Здесь составляющая (17), обозначенная как  $\bar{V}_{B_{\text{отн}}}$ , формируется перемещением по координате  $y$  и представляет собой скорость точки  $B$  в относительном движении (при  $z(t) = 0$ ); вектор скорости  $\bar{V}_{B_{\text{отн}}}$  перпендикулярен линии  $AO_1$  (см. рисунок 4). В свою очередь составляющая скорости т.  $B$ , вызванная движением основания, характеризует скорость точки  $B$  в переносном движении  $\left( \dot{y} = 0 \right) - \bar{V}_{B_{\text{пер}}}$  и возникает при движении основания  $\dot{z}$ . Вектор этой скорости перпендикулярен прямой  $A_1O_2$  (см. рисунок 4). Скорость точки  $B$  в абсолютном движении может быть определена через проекции  $\bar{V}_B$  на оси вспомогательной системы координат  $x_0, y_0$  (черточка над обозначением скорости отражает ее векторную сущность).

Запишем выражение (17) в проекциях на оси координат  $x_0, y_0$ :

$$V_{B_{x0}} = V_{B_{\text{отн}x0}} + V_{B_{\text{пер}x0}} = V_{B_{\text{отн}}} \cdot \cos \alpha - V_{B_{\text{пер}}} \cdot \cos \beta; \quad (18)$$

$$V_{B_{y0}} = V_{B_{\text{отн}y0}} + V_{B_{\text{пер}y0}} = -V_{B_{\text{отн}}} \cdot \sin \alpha - V_{B_{\text{пер}}} \cdot \sin \beta. \quad (19)$$

В данном случае, зная проекции, найдем, что

$$V_B^2 = \left( V_{B_{\text{отн}x0}} + V_{B_{\text{пер}x0}} \right)^2 + \left( V_{B_{\text{отн}y0}} + V_{B_{\text{пер}y0}} \right)^2. \quad (20)$$

Что касается значений  $V_{B_{\text{отн}}}$  и  $V_{B_{\text{пер}}}$ , то они определяются соотношениями:

$$\begin{cases} V_{B_{\text{отн}}} = \dot{y} \cdot a; \\ V_{B_{\text{пер}}} = \dot{z} \cdot a_1. \end{cases} \quad (21)$$

Здесь коэффициент  $a$  определяется выражением (2). В свою очередь параметр  $a_1$ , используемый при оценке скорости т.  $B$  при движении опорной поверхности обозначается как

$$a_1 = \frac{\cos \alpha}{\sin \beta (\cos \alpha + i \cdot \cos \beta)}. \quad (22)$$

Таким образом,

$$V_B^2 = \left[ -\dot{y} a \cdot \cos \alpha + \dot{z} a_1 \cdot \cos \beta \right]^2 + \left[ -\dot{y} a \cdot \sin \alpha - \dot{z} a_1 \cdot \sin \beta \right]^2. \quad (23)$$

Скорости точек  $B$  и  $B_1$  связаны соотношениями, которые формируются с учетом положения мгновенных центров скоростей  $O_1$  и  $O_2$  (см. рисунок 4):

$$V_{B_{\text{отн}}} = \dot{y} a \frac{l_1 + l_3}{l_1} = \dot{y} a \cdot i_1; \quad (24)$$

$$V_{B_{\text{пер}}} = \dot{z} a_1 \frac{l_5}{l_4} = \dot{z} a_1 \cdot i_2, \quad (25)$$

где

$$i_2 = \frac{l_5}{l_4}. \quad (26)$$

Проекция скорости точки  $B_1$  при кинематическом возмущении определяются по формулам:

$$V_{B_{1x0}} = V_{B_{\text{отн}x0}} + V_{B_{\text{пер}x0}} = V_{B_{\text{отн}}} \cdot \cos \alpha - V_{B_{\text{пер}}} \cdot \cos \alpha_2; \quad (27)$$

$$V_{B_{1y0}} = V_{B_{\text{пер}y0}} + V_{B_{\text{отн}y0}} = -V_{B_{\text{отн}}} \cdot \sin \alpha - V_{B_{\text{пер}}} \cdot \sin \alpha_2. \quad (28)$$

Значение  $V_{B_1}$ , необходимое для определения кинетической энергии, определится через выражения (27), (28):

$$V_{B_1}^2 = \left[ \dot{y} a \cdot i_1 \cdot \cos \alpha - \dot{z} a_1 \cdot i_2 \cdot \cos \alpha_2 \right]^2 + \left[ -\dot{y} a \cdot i_1 \cdot \sin \alpha - \dot{z} a_1 i_2 \cdot \sin \alpha_2 \right]^2. \quad (29)$$

Для определения потенциальной энергии системы необходимо найти деформации пружин  $k_1$  и  $k_2$ . Что касается деформации пружины  $k_2$ , то горизонтальное суммарное смещение точек  $B_1$  и  $B'_1$  определяется по уравнению:

$$\delta_{x_{0B_1B'_1}} = \dot{y} a i_1 \cdot \cos \alpha - \dot{z} a_1 i_2 \cdot \cos \alpha_2. \quad (30)$$

В определении смещения по нижнему рычагу будем полагать, что деформация пружины  $k_1$  будет происходить по направлению проекции как сумма двух движений на направление  $AO_1$  (или  $AB_1$ ):

$$\delta_{BB_0} = V_{BA_1} \cdot \sin(\alpha + \beta) - V_{B_{\text{пер}}} \cdot \sin(\alpha + \beta). \quad (31)$$

Так как из рисунка 4 следует, что

$$V_{BA_1} = \dot{y} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (32)$$

то

$$\delta_{BB_0} = \dot{y} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \sin(\alpha + \beta) - \dot{z} a_1 \cdot \sin(\alpha + \beta) \quad (33)$$

или

$$\delta_{BB_0} = \sin(\alpha + \beta) \cdot \left( \dot{y} a \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} - \dot{z} a_1 \right). \quad (34)$$

Используя схему на рисунке 4, определим угол  $\alpha_2$  по теореме синусов:

$$\frac{\sin(\alpha + \alpha_2)}{AO_2} = \frac{\sin(90 - \alpha)}{l_5} = \frac{\cos \alpha}{l_5}. \quad (35)$$

Обозначим  $B_1O_3 = l_5 \cdot \cos \alpha_2$ , а  $B_1O_3 = (l_1 + l_3) \cdot \cos \alpha$ , тогда  $l_5 \cdot \cos \alpha_2 = (l_1 + l_3) \cdot \cos \alpha$  или  $l_5 = \frac{(l_1 + l_3) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_2}$ .

После подстановки  $l_5$  в выражение (35) имеем:

$$\frac{\sin(\alpha + \alpha_2)}{(l_1 \cdot \cos \alpha + l_2 \cdot \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta} = \frac{\cos \alpha_2}{(l_1 + l_3)}. \quad (36)$$

Преобразуем уравнение (36) к виду:

$$\frac{\sin(\alpha + \alpha_2)}{\cos \alpha_2} = \frac{(l_1 \cdot \cos \alpha + l_2 \cdot \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta}{(l_1 + l_3)}. \quad (37)$$

Тогда из формулы (37) можно получить:

$$\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{(l_1 \cdot \cos \alpha + l_2 \cdot \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta}{(l_1 + l_3)} \quad (38)$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{[(l_1 \cdot \cos \alpha + l_2 \cdot \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta - \sin \alpha \cdot (l_1 + l_3)]}{\cos \alpha \cdot (l_1 + l_3)}. \quad (39)$$

Что касается определения  $l_5$ , то

$$l_5 = \frac{(l_1 + l_3) \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_2}. \quad (40)$$

Необходимое значение  $l_4$  можно найти из соотношения:

$$l_4 = (l_1 \cdot \cos \alpha + l_1 \cdot \cos \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta - l_2. \quad (41)$$

На основании полученных соотношений компоненты кинетической энергии  $T = T_0 + T_1 + T_2$  определяются следующим образом:

$$T_0 = \frac{1}{2} m_0 \left( \dot{y} \right)^2; \quad (42)$$

$$T_1 = 2 \cdot \frac{1}{2} m_1 V_B^2 = m_1 \cdot \left[ a^2 \left( \dot{y} \right)^2 + a_1^2 \left( \dot{z}_1 \right)^2 + 2 \dot{y} \dot{z} a a_1 \cdot (\sin \alpha \cdot \sin \beta - \cos \alpha \cdot \cos \beta) \right]; \quad (43)$$

$$T_2 = m_2 V_{B_1}^2 = m_2 \cdot \left[ a^2 \left( \dot{y} \right)^2 i_1^2 + a_1^2 \left( \dot{z}_1 \right)^2 i_2^2 + 2 \dot{y} \dot{z} a a_1 \cdot i_1 \cdot (\sin \alpha \cdot \sin \alpha_2 - \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2) \right]. \quad (44)$$

Выражение для потенциальной энергии принимает вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_0 (y - z)^2 + k_1 \left[ y a \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} - \dot{z} a_1 \cdot \sin(\alpha + \beta) \right]^2 + \frac{1}{2} \cdot k_2 [y a i_1 \cdot \cos \alpha - z a_1 i_2 \cdot \cos \alpha_2]^2. \quad (45)$$

Используем уравнение Лагранжа второго рода для получения математической модели и получим математическую модель системы (см. рисунок 1) в виде дифференциального уравнения движения в операторной форме:

$$\begin{aligned} & \tilde{y} \left( m_0 + 2m_1 a^2 + 2m_2 a^2 i_1^2 \right) p^2 + k_0 + 2k_1 a^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta} \cdot \sin^2 (\alpha + \beta) + 2k_2 a^2 i_1^2 \cdot \cos^2 \alpha = \\ & = \tilde{z} \cdot \left[ -2m_1 a a_1 (\sin \alpha \cdot \sin \beta - \cos \alpha \cdot \cos \beta) - 2m_2 a a_1 i_1 (\sin \alpha \cdot \sin \alpha_2 - \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2) \right] p^2 + \\ & \quad + k_0 + 2k_1 \cdot a a_1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \sin (\alpha + \beta) + 2k_2 \cdot a a_1 i_1 i_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (46)$$

Передаточная функция системы при кинематическом воздействии принимает вид:

$$W(p) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}} = \frac{\left( -2a a_1 \left[ m_1 (\sin \alpha \cdot \sin \beta - \cos \alpha \cdot \cos \beta) + m_2 i_1 (\sin \alpha \cdot \sin \alpha_2 - \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2) \right] p^2 + k_0 + \right.}{\left. + 2a a_1 \left[ k_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cdot \sin (\alpha + \beta) + k_2 i_1 i_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2 \right] \right)}{\left( (m_0 + 2m_1 a^2 + 2m_2 a^2 i_1^2) \cdot p^2 + k_0 + 2k_1 a^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta} \cdot \sin^2 (\alpha + \beta) + 2k_2 a^2 i_1^2 \cdot \cos^2 \alpha \right)}. \quad (47)$$

Сравнение выражения (46) с передаточной функцией системы при силовом возмущении (12) показывает, что числитель (46) имеет более сложный вид. В данном случае ситуация может рассматриваться как расширение возможностей настройки системы на определенную реакцию системы по отношению к внешнему воздействию, система совершает малые колебания и рассматривается как линейная. В зависимости от соотношения настроечных параметров системы, к которым можно отнести углы установки звеньев  $\alpha$  и  $\beta$ , длины звеньев  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ , массы  $m_1$ ,  $m_2$  и жесткости  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  упругих элементов. В зависимости от соотношения параметров элементов система может обладать различными динамическими свойствами.

Преобразуем передаточную функцию (47) к виду:

$$W(p) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}} = \frac{R_1 p^2 + R_2}{M p^2 + R_3}; \quad (48)$$

$$R_1 = -2a a_1 \left[ m_1 (\sin \alpha \cdot \sin \beta - \cos \alpha \cdot \cos \beta) + m_2 i_1 (\sin \alpha \cdot \sin \alpha_2 - \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2) \right]; \quad (49)$$

$$R_2 = k_0 + 2a a_1 k_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \sin (\alpha + \beta) + 2a a_1 i_1 i_2 \cdot k_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha_2; \quad (50)$$

$$M = m_0 + 2m_1 a^2 + 2m_2 a^2 i_1^2; \quad (51)$$

$$R_3 = k_0 + 2k_1 a^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta} \cdot \sin^2 (\alpha + \beta) + 2k_2 a^2 i_1^2 \cdot \cos^2 \alpha. \quad (52)$$

Выражения (49) – (52) являются коэффициентами в передаточной функции (47) и определяют динамические свойства системы.

Рассмотрим более подробно выражения (48), (49), которые могут принимать нулевые значения, а также в зависимости от значений настроечных параметров становятся положительными или отрицательными величинами. В соответствии с таким подходом можно рассматривать следующие варианты:  $R_1 = 0, R_2 > 0$ ;  $R_1 > 0, R_2 = 0$ ;  $R_1 > 0, R_2 < 0$ ;  $R_1 < 0, R_2 > 0$ ;  $R_1 < 0, R_2 = 0$ ;  $R_1 > 0, R_2 > 0$ ;  $R_1 = 0, R_2 = 0$  (всего восемь вариантов).

В зависимости от значений  $R_1$  и  $R_2$  будет существенно изменяться вид амплитудно-частотной характеристики. Если  $R_1 = 0$  (при  $R_2 > 0$ ), то система имеет вид обычной колеба-

тельной системы при кинематическом возмущении. В такой системе возможен резонанс при частоте

$$\omega_{\text{соб}} = \sqrt{\frac{R_3}{M}}, \quad (53)$$

где  $M = m_0 + m_1 a^2 + m_2 a^2 i_1^2$  зависит от масс дополнительных элементов, а  $R_3$  – от соотношения жесткостей конструктивно-технических параметров. Однако свойства такой системы вполне предсказуемы и известны. При выполнении условий  $R_1 < 0$ ,  $R_2 > 0$  система обладает особенностями в зарезонансной области. В этом случае амплитудно-частотная характеристика приближается к некоторому пределу при  $\omega \rightarrow \infty$ :

$$W(p) \underset{p \rightarrow \infty}{=} \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}} = \frac{R_1}{M}. \quad (54)$$

При этом режим динамического гашения может быть как при меньшем, так и при большем значении частоты собственных колебаний, при  $\omega \rightarrow \infty$   $W(p)$  стремится к пределу  $R_1/M$ , при этом амплитудно-частотная характеристика стремится к пределу снизу.

Возможны и другие режимы колебаний, возникающие, например, при  $R_2 < 0$ . Наиболее интересен режим, при котором одновременно  $R_1 = 0$ ,  $R_2 = 0$ . В этом случае инерционные силы, возникающие на дополнительных массах  $m_1$  и  $m_2$ , при движении опорной поверхности полностью компенсируются, что приводит к тому, что объект защиты будет находиться в состоянии неподвижности при всех частотах внешнего кинематического возмущения.

Введение в структуру механической колебательной системы рычажно-шарнирных связей, реализуемых двухповодковыми группами Асура, позволяет существенным образом изменять свойства исходных систем. При этом могут возникать различные задачи формирования необходимых динамических состояний объектов управления или, к примеру, вибрационной защиты. Существенным является то обстоятельство, что механические цепи, работающие параллельно упругим элементам базовой системы, при определенных видах внешних воздействий могут создавать в структуре системы дополнительные инерционные силы, которые изменяют динамические реакции системы, а в некоторых случаях могут и компенсировать динамические реакции, создавая новые виды режимов динамического гашения. Можно полагать, что введение дополнительных механических цепей представляет собой при определенных условиях форму реализации принципа инвариантности, который предполагает возможность управления состоянием системы по внешнему возмущению. В такой физической интерпретации механическая колебательная система в рассмотренном в статье виде или подобных вариантах может обеспечивать расширение возможностей в поиске новых принципов и средств управления динамическим состоянием технических объектов.

Предлагается метод построения математических моделей механических колебательных систем и оценки динамических систем на основе использования представлений о возможности сопоставления механической системе эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Детализированное изучение динамических свойств может быть построено на основе частотных методов динамического синтеза в рамках структурной теории виброзащитных систем, основные положения которых нашли отражения в работах [3 – 5].

## Список литературы

1. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движениями [Текст] / Е. С. Брискин, В. В. Жога и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 191 с.
2. Елисеев, С. В. Мехатроника виброзащитных систем с рычажными связями [Текст] / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко, Р. Ю. Упырь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2009. – № 3 (23). – С. 104 – 119.

3. Белокобыльский, С. В. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи [Текст] / С. В. Белокобыльский, С. В. Елисеев, И. С. Ситов. – СПб: Политехника, 2013. – 319 с.
4. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник и др. / Иркутский гос. ун-т. – Иркутск, 2008. – 523 с.
5. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2011. – 394 с.
6. Елисеев, С. В. Динамика механических систем с дополнительными связями [Текст] / С. В. Елисеев, Л. Н. Волков, В. П. Кухаренко. – Новосибирск: Наука, 1990. – 386 с.
7. Хоменко, А. П. О связи режимов динамического гашения колебаний со структурой системы внешних воздействий [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2011. – № 1 (29). – С. 8 – 14.
8. Елисеев, С. В. Некоторые вопросы динамики взаимодействия в механических системах с рычажными связями [Текст] / С. В. Елисеев, А. И. Артюнин, Р. С. Большаков // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности / Муромский ин-т Владимирского гос. ун-та им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Муром, 2012. – № 4 (14). – С. 36 – 45.
9. Барсов, Г. А. Теория плоских механизмов и динамика машин [Текст] / Г. А. Барсов, Л. В. Безменова и др. – М.: Высшая школа, 1961. – 336 с.

## References

1. Briskin E. S., Zhoga V. V., Chernyshev V. V., Maloletov A. V. *Dinamika i upravlenie dvizheniem shagayuschikh mashin s tsiklovymi dvizheniyami* (Dynamics and traffic control of the treading machines with the cyclic movements). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009, 191 p.
2. Eliseev S. V., Khomenko A. P., Upyr' R. Yu. Mechatronics of vibroprotective systems with lever ties [Mekhatronika vibrozashchitnykh system s rychazhnymi svyazyami] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2009, no. 3 (23), pp. 104 – 119.
3. Belokobyl'skiy S. V., Eliseev S. V., Sitov I. S. *Dinamika mekhanicheskikh system. Rychazhnye i uprugoinertsionnye svyazi* (Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial and elastic ties). Saint-Petersburg: Politekhnik Publ., 2013, 319 p.
4. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P., Zasyadko A. A. *Dinamicheskii sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov* (Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects). Irkutsk, 2008, 523 p.
5. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. *Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh system* (Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillatory systems). Novosibirsk: Nauka Publ., 2011, 394 p.
6. Eliseev S. V., Volkov L. N., Kukhareno V. P. *Dinamika mekhanicheskikh system s dopolnitel'nyimi svyazyami* (Dynamics of mechanical systems with additional ties). Novosibirsk: Nauka Publ., 1990, 386 p.
7. Khomenko A. P., Eliseev S. V. About relation of modes of dynamic blanking out of oscillations with structure of system of external influences [O svyazi rezhimov dinamicheskogo gasheniya kolebaniy so strukturoy sistemy vneshnikh vozddeystviy]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2011, no. 1 (29), pp. 8 – 14.
8. Eliseev S. V., Artyunin A. I., Bol'shakov R. S. Some questions of dynamics of interaction in mechanical systems with lever ties [Nekotorye voprosy dinamiki vzaimodeystviya v mekhanicheskikh sistemakh s rychazhnymi svyazyami]. *Mashinostroennye i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Engineering industry and life safety*, 2012, no. 4(14), pp. 36 – 45.
9. Barsov G. A., Bezменова L. V., Gryadznskaya L. S., Zheligovskiy etc. *Teoriya ploskikh mekhanizmov i dinamika mashin* (Theory of flat mechanisms and dynamics of machines). Moscow, 1961, 336 p.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований по оценке возможности использования тепловых методов контроля герметичности котла железнодорожной цистерны. В данной работе отражены результаты исследования формирования тепловых полей на внешней поверхности резервуара в области сквозного дефекта типа трещина при дросселировании сквозь него газовой среды за счет перепада давления.*

*Полученные термограммы отражают локализацию дефекта с подробным описанием аномалий тепловых полей, зафиксированных тепловизором. Также практически подтверждены опыты, описанные в работах Джоуля и Томсона, по дросселированию газа сквозь местное препятствие.*

Потребность в подвижных единицах для перевозки добытого сырья на предприятия переработки растет с каждым днем. Также актуальным остается вопрос транспортировки готового продукта по стране и за ее пределы, что обуславливает рыночные отношения экономики страны. Поэтому поддержание высокого уровня надежности подвижного состава является неотъемлемой задачей инженеров транспорта.

При перевозке жидких и газообразных веществ как нельзя лучше подходит вагон-цистерна, обеспечивающий легкость налива-опорожнения емкости и сохранность транспортировки груза.

В связи со сложностью и объемом конструкции цистерн в условиях вагоноремонтного депо при контроле герметичности котла используют устаревшие методы диагностирования, что сказывается на его достоверности.

Применение новых бесконтактных методов неразрушающего контроля позволяет не только повысить достоверность контроля, но и сократить субъективный фактор и вывести оператора-дефектоскописта из опасной зоны проведения испытаний.

Решением данной задачи является применение теплового вида неразрушающего контроля, основанного на активном методе, реализующемся за счет охлаждения поверхности около дефекта (типа трещина) при прохождении сжатого воздуха сквозь течь в теле котла [1]. Данное явление, описанное в работах Д. Джоуля и В. Томсона в 1852 – 1862 гг., получило название эффекта Джоуля – Томсона [2], который основан на изменении температуры газа при адиабатическом расширении (дросселировании), т. е. на медленном протекании газа под действием постоянного перепада давления сквозь местное препятствие потоку газа.

Практически эффект Джоуля – Томсона может быть осуществлен без использования пробки, как описывается в работе [2]. Если газ под давлением будет протекать в пространство с низким давлением (порядка атмосферного), например, через вентиль или узкое отверстие, то также возникает перепад температур. Такой процесс аналогичен течению газа по широкой трубе, в которой есть узкое отверстие (течь), за которым труба безгранично расширяется.

С целью практического подтверждения законов термодинамики при истечении газа сквозь течь проведем исследования по определению температурного контраста, возникающего при истечении газа, с возможностью его регистрации тепловизионной аппаратурой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) подтвердить эффект Джоуля – Томсона при протекании сжатого воздуха сквозь течь в теле котла железнодорожной цистерны при перепаде давления не более 6 атм;

2) выявить градиент температуры на поверхности исследуемого резервуара или в приповерхностном слое воздуха при изменении давления истекающего рабочего тела (воздуха) сквозь течь разной длины;

3) подтвердить адекватность использования теплового вида неразрушающего контроля при проведении испытаний на герметичность сосудов, в частности, котлов железнодорожных цистерн.

Экспериментальные исследования проводились с использованием сосуда в виде запасного тормозного резервуара грузового вагона типа Р7-78, внешний вид которого представлен

на рисунке 1. Запасной тормозной цилиндр так же, как и котел железнодорожной цистерны, состоит из цилиндрической обечайки 3 (см. рисунок 1) и двух днищ 2. Для подачи воздуха в резервуаре имеются два технологических отверстия в виде штуцеров, расположенных на днище (штуцер 1) и на обечайке (штуцер 4).

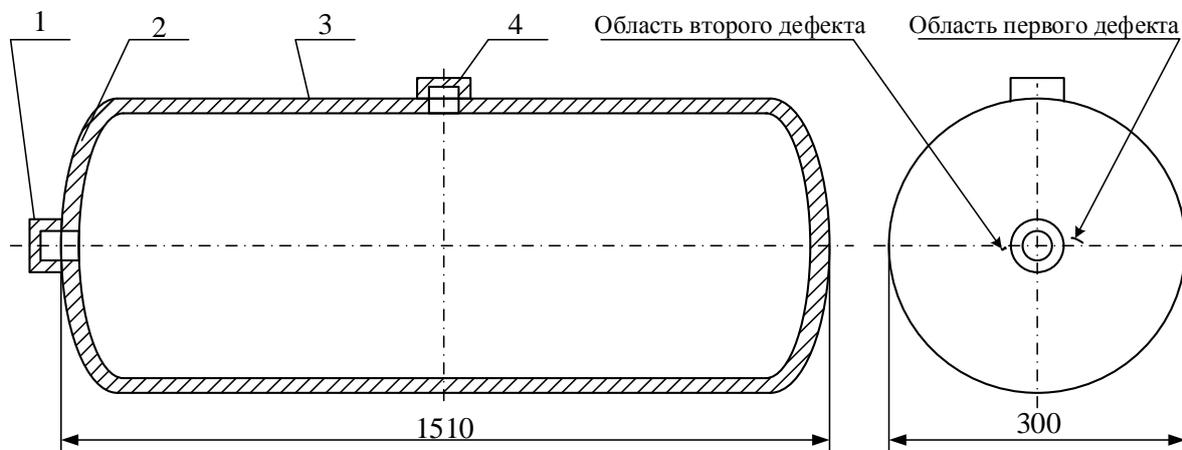


Рисунок 1 – Внешний вид резервуара

В теле исследуемого резервуара имеются два дефекта типа трещина, образованных в результате механического воздействия (удара) в ходе эксплуатации резервуара. Трещины расположены в районе штуцера днища (см. рисунок 1, позиция 1) и имеют размеры 3 и 7 мм.

Для проведения испытаний следует собрать пневмосхему, представленную на рисунке 2.

Исследования истечения воздуха сквозь течь при разном уровне давления производились по следующему алгоритму.

1. Собрать схему испытаний (см. рисунок 2).

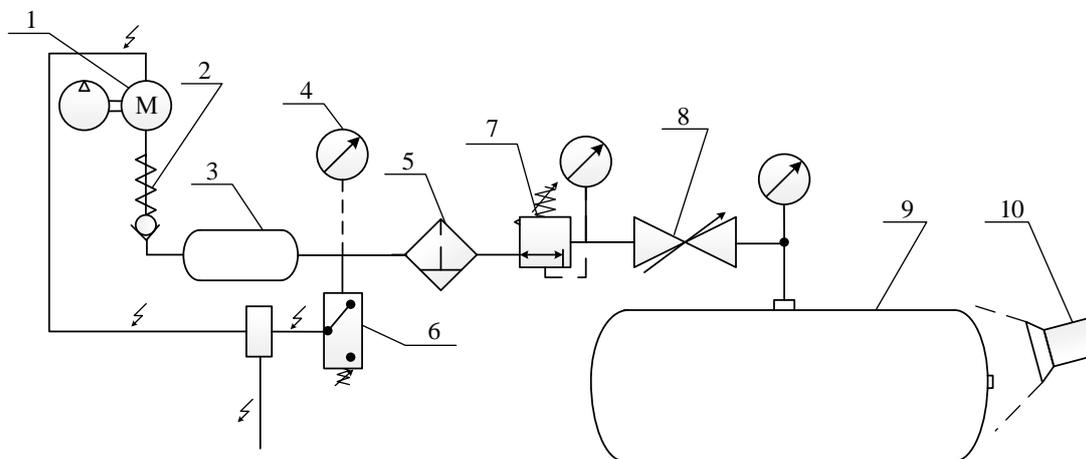


Рисунок 2 – Функциональная пневмосхема экспериментальной установки: 1 – вакуумный компрессор; 2 – обратный клапан; 3 – ресивер; 4 – манометр; 5 – фильтр со сбросом конденсата; 6 – реле вакуума; 7 – регулятор давления со сбросом избыточного давления и манометром; 8 – клапан регулирующий, дозирующий; 9 – резервуар; 10 – тепловизор

2. Установить тепловизионную аппаратуру в области первого дефекта таким образом, чтобы его объектив был защищен от прямого попадания потоков, вырывающихся сквозь течь воздуха под давлением.

3. Произвести съемку поверхности резервуара в области расположения течи в равновесном состоянии (без истечения воздуха сквозь течь).

4. Подать в резервуар воздух под давлением 1 атм, при этом запустить секундомер.

5. Провести съемку поверхности и приповерхностного слоя дефектной области через 1, 2, 5, 10, 15 минут опрессовки резервуара.

6. Последовательно увеличить давление воздуха до 6 атм с шагом 1 атм, при этом на каждом этапе повторить операции, описанные в п. 4, 5, опорожнить резервуар.

7. Установить тепловизионную аппаратуру в области второго дефекта таким образом, чтобы потоки истекающего воздуха не попадали в объектив тепловизора.

8. Провести съемку второй области дефекта согласно указаниям п. 4 – 6.

9. Провести анализ термограмм на факт наличия аномальных температурных зон исследуемой области резервуара.

10. Оценить изменение температурного контраста в зависимости от времени дросселирования и перепада давления.

В результате проведения испытаний выявлено, что при дросселировании воздуха сквозь дефект (течь) при перепаде давления между стенками резервуара создается разность (градиент) температур. Истекающий поток воздуха, проходя сквозь течь, в результате резкого расширения расходует свою внутреннюю энергию на изменение температуры потока воздуха. На внешней поверхности резервуара за счет трения граничных струек потока происходит охлаждение берегов течи. Далее за счет теплопроводности материала резервуара происходит охлаждение области вокруг течи, как результат создается тепловой контраст на внешней поверхности, фиксируемый теплочувствительным оборудованием (тепловизором).

Данный факт свидетельствует о возникновении термодинамических процессов, описанных в работе Джоуля – Томсона [2].

При повышении давления воздуха, подаваемого в резервуар, выявлена связь между величиной давления и температурой потока воздуха, истекающего сквозь течь (рисунок 3), характеризующаяся коэффициентом Джоуля – Томсона:

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H,$$

где  $\mu$  - коэффициент Джоуля – Томсона;

$\left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$  - изменение температуры при малом изменении давления и постоянстве энтальпии.

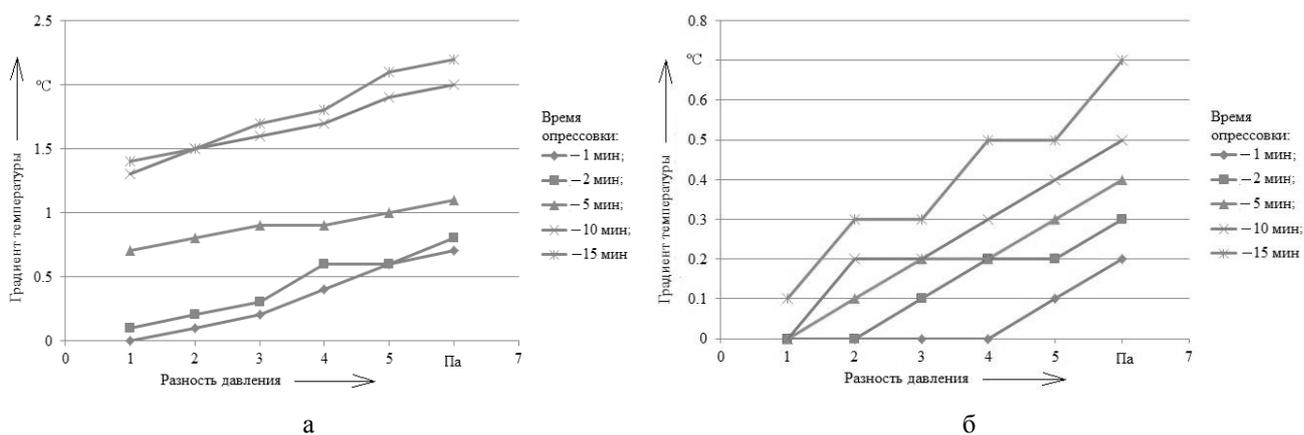


Рисунок 3 – График зависимости градиента температур от перепада давления: дефект длиной 7 мм – первая область (а); дефект длиной 3 мм – вторая область (б)

Из графиков на рисунке 3 видно, что градиент температур в области дефектов зависит не только от давления воздуха, подаваемого в резервуар, но и от времени протекания его через течь (дросселировании). Так, по истечении одной минуты при низком давлении (1 – 2 атм) выявление течи невозможно, это связано с формированием низкого контраста температур. При продолжительном истечении воздуха (см. рисунок 3) контраст увеличивается за счет конвекционной теплоотдачи и позволяет выявить дефекты длиной от 7 мм (рисунок 3, а).

Дальнейшее изменение температурного градиента в пределах перепада давления 1 – 6 атм происходит с плавным ростом. По истечении 10 минут способность обнаружения дефектов улучшается, что подтверждается формированием градиента от 1,3 до 2°С в области первого дефекта (см. рисунок 3, а) и от 0,1 до 0,5°С – во второй области (рисунок 3, б). Такого перепада достаточно для фиксирования и обнаружения течи с использованием теплочувствительной аппаратуры.

При истечении воздуха в течение 15 мин изменение градиента незначительно (см. рисунок 3) и отличается от результата последнего проведенного опыта лишь на сотые доли градуса. Дальнейшая опрессовка резервуара бессмысленна, так как минимальный предел чувствительности аппаратуры достигнут, что позволяет уже по истечении 15 мин локализовать течь.

В ходе проведенного исследования можно сделать вывод о влиянии времени на формирование градиента температур. Проведение дросселирования в течение 15 мин достаточно для формирования температурного градиента порядка 1 °С для трещин от 3 мм и 2 °С для трещин длиной от 7 мм (см. рисунок 3).

При повышении давления скорость истечения воздуха из резервуара через течь увеличивается, что способствует уменьшению температуры потока и более интенсивному охлаждению берегов течи.

На рисунках 4 и 5 представлены термограммы и фотографии резервуара в области течи в начальный момент времени, без дросселирования.

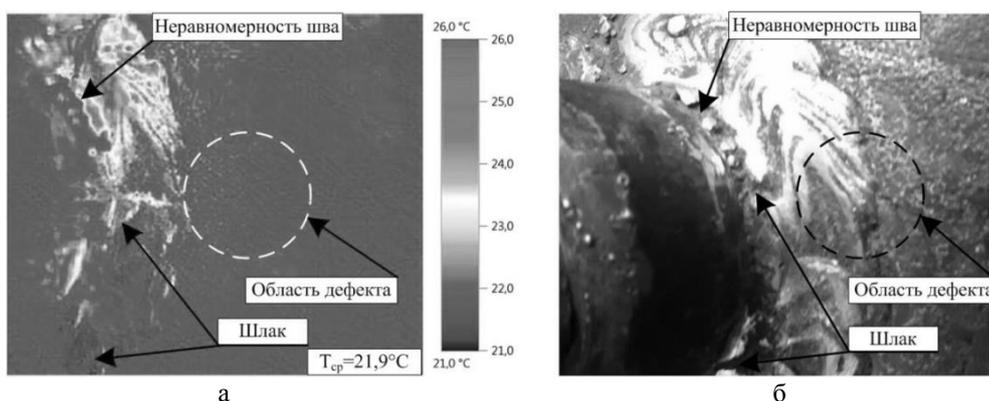


Рисунок 4 – Термограмма области резервуара с первым дефектом в начальный момент времени

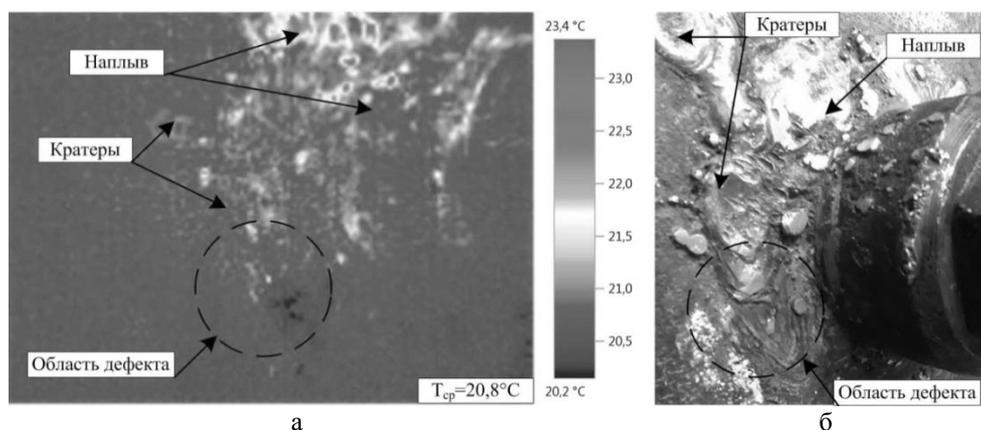


Рисунок 5 – Термограмма области резервуара со вторым дефектом в начальный момент времени

На термограмме четко прослеживается температура основной поверхности резервуара, равная в среднем 21 °С. Также наблюдаются поверхностные дефекты резервуара, характеризующиеся изменением температуры поверхности, в виде шлаковых включений, неравномерности сварного шва, наплыва и брызг металла. В предполагаемых областях нахождения дефектов (см. рисунки 4 и 5) следов градиента температуры не наблюдается.

В момент подачи сжатого воздуха в резервуар под давлением 1 атм на термограмме изменений не наблюдается, в свою очередь на манометре резервуара фиксируется падение давления, что свидетельствует об утечке воздуха из резервуара.

По истечении 10 мин с момента подачи воздуха в резервуар, при постоянном давлении в сосуде, равном 1 атм, на термограмме возникает градиент температуры, фиксируемый тепловизором в области предполагаемой первой течи (рисунок 6).

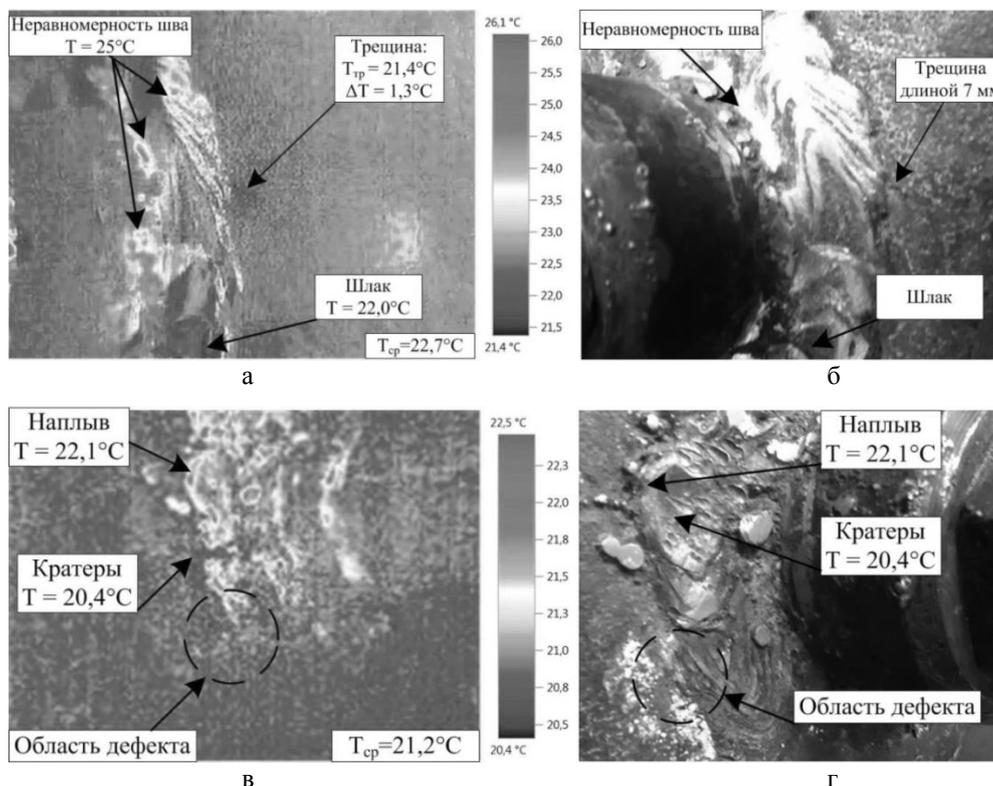


Рисунок 6 – Термограммы резервуара при перепаде давления 1 атм: дефект длиной 7 мм – первая область (а, б); дефект длиной 3 мм – вторая область (в, г)

Градиент температуры в области первой течи составляет порядка  $0,5^{\circ}\text{C}$ , образуя по берегам сквозной трещины область контраста температур, линейные размеры которой позволяют оценить длину предполагаемого дефекта, равную 7 мм.

При нагружении резервуара воздухом под давлением 2 атм также происходит охлаждение берегов течи на внешней поверхности резервуара, но время, затраченное на процесс формирования температурного градиента первой течи (длиной 7 мм), сокращается и составляет уже 7 мин.

В свою очередь при давлении 2 атм в области второго дефекта происходит формирование температурного контраста, на что затрачивается 9 мин, при этом разность температур составляет  $0,2^{\circ}\text{C}$  (рисунок 7).

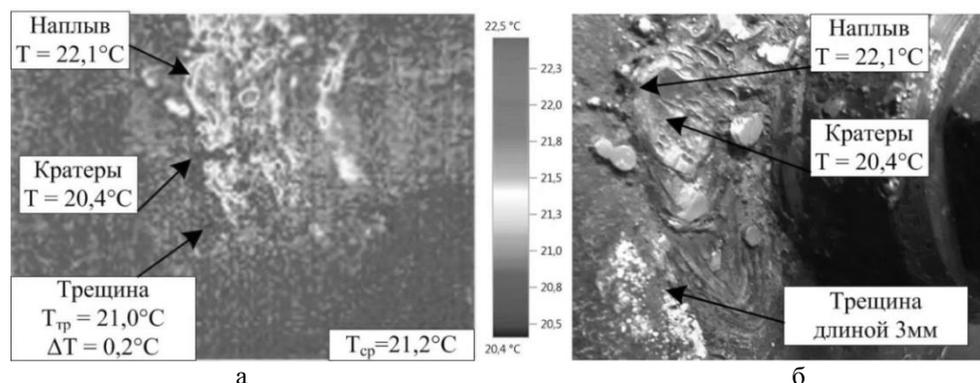


Рисунок 7 – Термограмма резервуара при перепаде давления 2 атм в области второго дефекта

По температурному контрасту второй области дефекта (см. рисунок 7), зафиксированному тепловизором, точно определить длину не представляется возможным, так как трещина находится около кратера сварного шва (длина трещины составляет примерно 3 мм).

Дальнейшее повышение давления до 6 атм подтверждает результаты, полученные при низком давлении (1, 2 атм), на термограммах в областях трещин (рисунок 8) наблюдаются охлаждение и температурный контраст, но времени на формирование такого контраста требуется меньше, 1 мин для трещины 7 мм и 3 мин для трещины 3 мм.

Помимо этого на процесс формирования температурного градиента берегов течи влияют теплофизические характеристики, описываемые коэффициентами теплопроводности материала резервуара и коэффициентом конвекционной теплопередачи воздуха. От этих двух коэффициентов зависит время формирования пятна аномальной температуры на внешней поверхности резервуара.

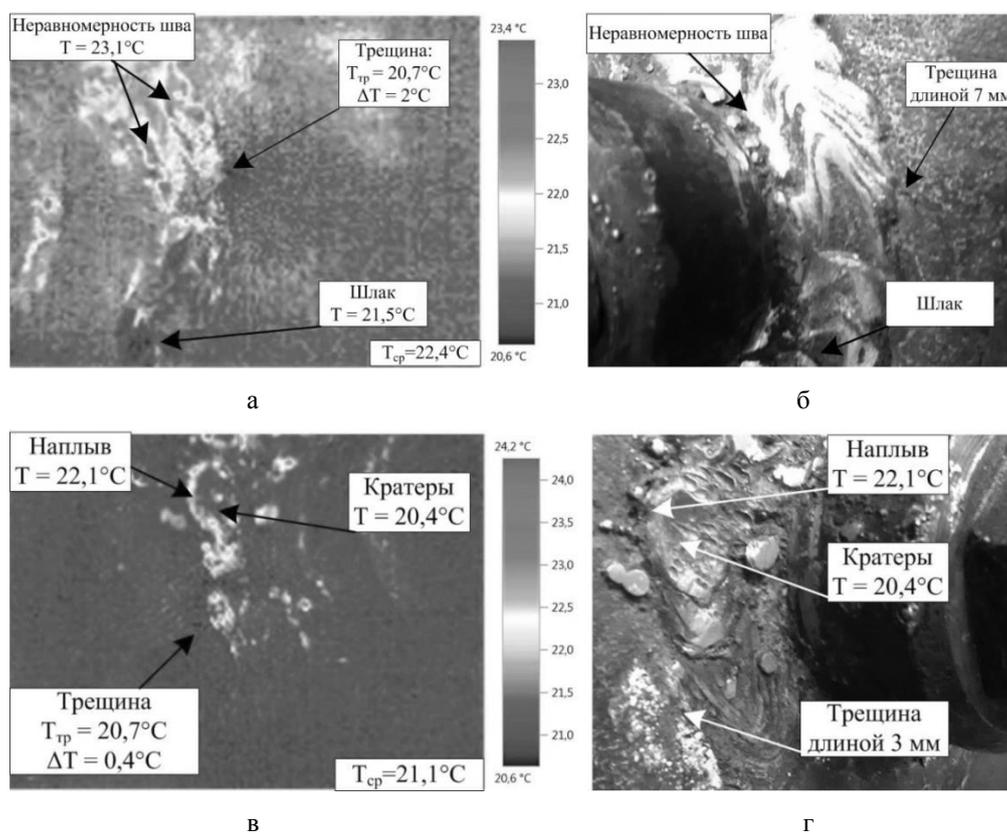


Рисунок 8 – Термограммы резервуара при давлении 6 атм: область дефекта длиной 7 мм – первый дефект (а, б); область дефекта 3 мм – второй дефект (в, г)

Проведенное исследование подтверждает практическое применение законов термодинамики при дросселировании воздуха сквозь малые отверстия (течи), в частности, эффект Джоуля – Томсона. Этот факт позволяет сделать вывод о применимости данного эффекта при проведении освидетельствования котлов железнодорожных цистерн в условиях вагоноремонтного депо тепловыми способами неразрушающего контроля. Для достижения этого используется штатное оборудование, имеющееся на любом предприятии, производящем ремонт подвижного состава, что удешевляет процесс диагностики цистерн.

Таким образом, в ходе проведенного исследования удалось практически подтвердить эффект Джоуля – Томсона при истечении газа сквозь малые отверстия за счет перепада температур не более 6 атм. Данного давления достаточно для фиксации образующегося температурного контраста на поверхности резервуара и определения области течи последнего.

Установлена связь между перепадом давления истекающего сквозь течь воздуха и температурным контрастом, образующимся в области сквозных дефектов. Установлена связь между размером дефекта и временем формирования контраста на устранение дефекта меньшего размера при одинаковом перепаде давления требуется больше времени.

На основании полученных результатов выявлена возможность применения тепловизионных методов неразрушающего контроля для проведения освидетельствования котлов железнодорожных цистерн на герметичность в условиях вагоноремонтного депо. Для проведения такого вида диагностики используется штатное оборудование, имеющееся на любом ремонтном предприятии.

## Список литературы

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

2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика: Учебное пособие [Текст]. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 2. – 544 с.

## References

1. Akhmedzhanov R. A., Kondratenko E. V. Patent RU 2012152487 G01, 05.12.2012.

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

УДК 625.1

Я. А. Новачук, Д. Н. Никитин, Р. В. Коблов, А. Н. Тепляков

## НОВАЯ ПАРАДИГМА КИНЕМАТИКИ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

*Предметом исследований является определение и обоснование математических характеристик движения железнодорожного колеса, адекватно отражающих механизм его взаимодействия с рельсом.*

*Целью работы является адаптация фундаментальных положений циклоидальных кривых, отражающих движение круга, к движению условных точек топологических кругов сечения бандажа железнодорожного колеса, имеющего сложный профиль.*

*Методология работы построена на изучении и систематизации фундаментальных исследований в области геометрии, математики и механики идеализированного движения круга, в основу которого положены математические свойства циклоидальных кривых. Приведена модель движения колеса железнодорожной колесной пары (с неподвижными колесами на оси), в основу которой положены кинематические и механические свойства голономных систем. В соответствии с общими голономными, фундаментальными математическими свойствами системы, установлены аналитические зависимости и соотношения кинематических параметров поступательной скорости подвижного состава и скорости взаимодействия колес с рельсами, которые позволяют дополнять методологию тяговых расчетов в России и в других странах. В настоящее время в отечественной практике используют десятки различных формул, в которые включена составляющая линейной скорости движения, а не скорость взаимодействия колес с рельсами с учетом их физических и геометрических параметров. Линейная (поступательная) скорость движения колеса недостаточно точно отражает механизм взаимодействия колес подвижного состава с рельсами.*

*Фундаментальная теория циклоидальных кривых дает возможность обоснованно аналитически нормировать скорость движения подвижного состава различных типов, его проектировщикам и создателям априори формировать конструкционные и технико-экономические характеристики, гарантирующие надежность, долговечность и эффективность работы оборудования экипажной части, снижая риск безопасности движения поездов.*

Актуальность очередного обращения к понятийной сущности кинематики движения колеса по рельсу определена принципиальными противоречиями, доминирующими в теоретических объяснениях этого явления отечественными и зарубежными учеными и исследователями в течение двух (XIX и XX) столетий.

Целью наших исследований является ознакомление изыскателей с фундаментальными математическими свойствами движения круга, которые положены в основу понятийной сущности движения топологических кругов, принадлежащих сложному профилю бандажа железно-

дорожного колеса. Принцип неизменяемой механической и кинематической голономных систем, каковыми являются железнодорожное колесо и колесная пара, дают право применить теорию циклоидальных кривых в решении приоритетных задач – при определении характера траекторий и численных значений скоростей и ускорений точек, принадлежащих топологическим кругам сложного профиля. Одновременно ставилась задача внести коррекцию в разномыслие представителей априорно-теоретических гипотез и необоснованных предположений при рассмотрении ими механизма взаимодействия систем «колесная пара – рельсовая колея».

Второе столетие в среде представителей науки не прекращаются дискуссии по разноплановым гипотезам несвободного движения по рельсовой колее ведущего колеса локомотива, имеющего реборду и сложный профиль бандажа. В этой связи нельзя не отметить разный уровень понимания исследователями неординарного движения ведущего колеса, особенности функций которого постоянно дискутируются в различных изданиях. Преобладающей точкой зрения утверждается, что «в частности, отсутствует метод определения скорости взаимодействия колес с рельсами» [1] и требуется более совершенная теория, поясняющая этот процесс [2].

Напомним, что ведущее колесо и колесные пары локомотивов выполняют многоплановый комплекс функций, которые предназначены непрерывно и постоянно гарантировать «устойчивую» и безопасную опору всей конструкции тягового подвижного состава на рельсовую колею в широком диапазоне условий эксплуатации (план, профиль) и скоростей движения;

минимальное сопротивление качению колесной пары на прямых и в кривых участках рельсовой колеи, которое соответствует нормативным положениям тягового подвижного состава;

устойчивое сцепление поверхностей катания колес и головок рельсов, обеспечивающее реализацию силы тяги и плавное ее изменение;

управляемый процесс торможения посредством формирования сил сопротивления качению без нарушения сцепления колес с рельсами.

Каждая из обозначенных функций имеет весьма широкую самостоятельность, и их не обошли вниманием известные всему миру ученые и исследователи.

До восьмидесятых годов девятнадцатого столетия сопротивление перекатыванию колес по рельсам, преимущественно вагонов, определяли эмпирическим способом. В среде международного научного сообщества исследователей по проблемам механики (кинематики и динамики) железнодорожного подвижного состава имеется устойчивое мнение о том, что первые попытки математического моделирования свободного движения одиночной колесной пары с коническим профилем бандажа (обода) на прямом участке колеи принадлежат Х. Клингелю [3]. Анализ предложенной модели с точки зрения сегодняшних знаний показывает, что в ее основу автором положена чрезмерно упрощенная схема движения колесной пары. В аналитических объяснениях Х. Клингель использует очевидную и постоянно наблюдаемую поступательную скорость центра оси колесной пары без анализа механизма взаимодействия колес с рельсами. Несмотря на принятый абстрактный принцип положения науки о поступательной скорости точки центра оси эта модель неоднократно дополнялась и корректировалась многими исследователями в течение всего XX в. (Боедекер, Уебелакер Г., Картер Ф. В., Портер С. М., Рокард Я., А. Д. де Патер и др.) и без принципиального аналитического анализа ее продолжают цитировать отдельные экспериментаторы в XXI в.

Однако крушения поездов, произошедшие на российских железных дорогах (в 1883 г. – воинского, а в 1888 г. – крушение поезда с царской семьей, возвращавшейся в Петербург), определили для инженеров и ученых России направления поиска ответов на практические задачи нормирования скорости подвижного состава по условиям воздействия колес на рельсовую колею. В работах профессоров Н. П. Петрова, Н. Е. Жуковского и Н. И. Карташева [4 – 6] впервые были предложены математические модели кинематических и динамических зависимостей параметров движения железнодорожных колес по рельсовой колее. Петров Н. П. впервые рассмотрел влияние неровностей на колесе и рельсах, напряжения в рельсе, предложил метод учета сил инерции колеса и элементов верхнего строения пути, а также вертикальных составляющих сил инерции от неуравновешенных движущихся частей

механизма паровоза [4]. Опираясь на работы Н. П. Петрова, специальная комиссия в 1915 г. разработала методику определения допускаемых нагрузок на оси подвижного состава и предельных скоростей движения на железных дорогах в зависимости от верхнего строения пути и типа паровозов. Эта методика просуществовала до 60-х гг. XX в. К сожалению, в настоящее время эти аналитические модели остаются за рамками внимания отечественных и зарубежных исследователей кинематики и динамики железнодорожного подвижного состава.

Не углубляясь в подробный хронологический анализ исследований математического моделирования движения железнодорожных колес, напомним, что еще известный античный философ – «отец логики» – Аристотель наблюдал очевидный, но «хитроумный» процесс движения круга без проскальзывания [7]. Результаты многочисленных опытов и анализ процессов качения круга без проскальзывания позволили Аристотелю определить траекторию, которую вычерчивает условная точка, принадлежащая кругу, и дать ей название «циклоида». Повторное изучение математических зависимостей, формируемых траекториями условных точек круга, который катится без проскальзывания, принадлежат Г. Галилею. В 1590 г. (спустя 1900 лет) Галилей впервые построил геометрическим методом траекторию проекции движения точки, принадлежащей кругу, и дал этому графику такое же наименование – «циклоида» – независимо от Аристотеля [8]. Галилей многократно исследовал подходы к аналитическим методам решения задач по определению площади, ограниченной аркой циклоиды и ее основанием, однако, не располагая математическим «инструментом», прекратил безуспешные занятия.

Углубленные, фундаментальные, многоплановые и результативные исследования циклоидальных кривых выполнили (в XVII – XIX вв.) известные мыслители, математики и физики: В. Вивiani, Е. Торичелли, Г. Персонье, Б. Паскаль, К. Рено, П. Ферма, Р. Декарт, Д. Тейлор и др. К началу XX в. в опубликованных работах Х. Гюйгенса, И. Ньютона, Г. Лейбница, И. и Я. Бернулли, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа приведены подробные и обоснованные методы применения фундаментальных положений математической теории циклоидальных кривых в практической механике.

Анализ результатов фундаментальных исследований выдающихся ученых математиков, в работах которых обоснованы законы движения круга, дает нам право

предложить изыскателям проблемных явлений колесного транспорта математическую теорию движения круга для использования ее в прикладных исследованиях механизмов взаимодействия железнодорожных колесных пар подвижного состава с рельсовой колеей;

утверждать, что физические и математические законы движения железнодорожного колеса находятся в одном ряду с теориями баллистики, летательных аппаратов, устойчивости корабля и т. д.;

внести поправки и уточнения в методологию анализа механизма явления взаимодействия колес с рельсами.

Предлагаемые дополнения к объяснению адаптации парадигмы кинематики взаимодействия колес с рельсами.

Рассмотрим плоскопараллельное движение топологического образующего круга (диаметр качения) профиля колеса (рисунок 1) как неизменяемую механическую и кинематическую голономную систему.

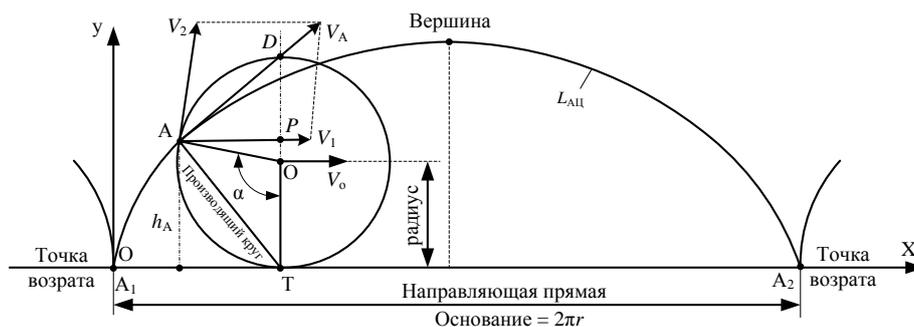


Рисунок 1 – Элементы обыкновенной циклоиды, принадлежащей точке А (изображена одна арка)

Напомним, что траектория движения условной точки А в плоскости, принадлежащей кругу катания колеса, является траекторией обыкновенной циклоиды [9], а ее график определяют уравнениями:

$$\begin{cases} x = r(\alpha - \sin \alpha); \\ y = r(1 - \cos \alpha). \end{cases} \quad (1)$$

Если из уравнений (1) исключить угловой параметр  $\alpha$ , то в прямоугольной системе координат уравнение циклоиды принимает вид:

$$x = r \cdot \arccos \frac{r-y}{r} - \sqrt{2ry - y^2}. \quad (2)$$

В основу адаптации зависимостей, соотношений и сочетаний кинематических свойств циклоиды с качением топологических кругов профиля железнодорожного колеса положены теоремы Н. Е. Жуковского [5] и Даламбера:

1. «Всякое движение свободной неизменяемой системы в бесконечно малый промежуток времени может быть разложено на: а) поступательное движение со скоростью некоторой точки тела и б) вращательное движение вокруг мгновенной оси, проходящей через эту точку.

2. «Всякое движение твердого тела, имеющего неподвижную точку, в бесконечно малый промежуток времени приводится к вращению вокруг мгновенной оси, проходящей через эту неподвижную точку».

Однако определение «циклоиды», которое сформулировали Аристотель и Галилей, не имело математической фундаментальности, так как оно опирается на понятия механики «качение», «скорость», «сложение движений» и т. д. В течение нескольких веков математики стремились дать циклоиде чисто математическое определение, но для этого необходимо было прежде всего изучить и обосновать основные ее свойства, пользуясь очевидностью их механического происхождения.

Чтобы дать циклоиде чисто математическое определение, независимое от механики, необходимо было выбрать наиболее характерное ее свойство, положив его в основу геометрического обоснования и аналитического подтверждения. Таким обобщающим свойством циклоиды является график траектории перемещения точки, находящейся на окружности, спроектированный на вертикальную плоскость. Арки образованы условной точкой А, которая находится на производящем круге, а круг катится без проскальзывания по прямой (направляющей прямой) неограниченно долго. Отдельные арки соединяются в точках (остриях), представляя бесконечный ряд арок (см. рисунок 1).

Эти точки называются точками возврата циклоиды и соответствуют самым низким положениям на графике траектории условной точки катящегося круга. Самые высокие положения находятся посередине между точками возврата; эти наивысшие точки называются «вершинами» циклоиды. Отрезок прямой линии между двумя соседними точками возврата, равный  $2\pi r$ , называется основанием одной арки циклоиды. Для достоверного восприятия закономерностей процесса качения круга и ассоциации его движения с механизмом взаимодействия колес и рельсов необходимо вспомнить определения

- кривизны графика движения точки А, проекции на вертикальную плоскость и ее радиуса;
- центра кривизны;
- эволюты;
- эвольвенты, касательной и нормали.

Эти определения даются в курсах высшей математики, и мы здесь их приводить не будем.

Результаты исследований показывают, что математическая модель движения условной точки А, принадлежащей кругу, позволяет определять ее скорость и ускорение взаимодействия с основанием по соотношению с поступательной скоростью центра круга (колеса) и его диаметром. Вектор результирующей скорости  $V_A$  согласно правилу сложения скоростей и

свойств циклоиды [8, 10] будет направлен по диагонали ромба под углом  $45^\circ$  к основанию циклоиды и к вектору скорости  $V_1$ . Так как  $\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , то

$$V_A = \sqrt{2} \cdot V_0 \approx 1,4142 \cdot V_0. \quad (3)$$

Определение скорости условной точки А, расположенной на круге катания колеса. В основе математических свойств циклоиды, последовательно рассмотренных в работе [10], и в модели движения круга [8] находится несколько методов определения сложной скорости условной точки А круга катания профиля бандажа. Рассмотрим наиболее наглядный метод сложения скоростей.

Точка контакта колеса и рельса Т (см. рисунок 1) является мгновенным центром поворота точки А перемещения по траектории циклоиды в интервале  $A_1 - A_2$ , равном  $2\pi r$  (свойства циклоиды: 1, 2, 3). Путь точки А по траектории  $L_{АЦ}$  больше расстояния  $2\pi r$  на 27,3 %. Согласно свойствами циклоиды и теореме Даламбера в условных точках возврата («замирания»)  $V_T = 0$ , а так как круг вращается с равномерной скоростью  $\omega_0$  относительно центра О, а центр перемещается с равномерной скоростью  $V_0$ , то точка А совершает сложное движение относительно точки Т. Вектор скорости центра О,  $V_0 = \frac{2\pi r}{t}$ , располагается параллельно основанию циклоиды. Вектор окружной скорости  $V_2$  является касательной к окружности. Результирующая и искомая скорость  $V_A$  будет направлена по диагонали ромба под углом  $45^\circ$  к основанию циклоиды и к скорости  $V_1$  (свойства циклоиды: 4, 5). Так как  $\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , то

$$V_A = \sqrt{2} \cdot V_0 \approx 1,4142 \cdot V_0. \quad (4)$$

При условии, что центр оси перемещается со скоростью  $V_0 = 100$  км/ч, скорость взаимодействия колеса с рельсом будет равна 141,42 км/ч.

В силу равномерного вращения  $V_A = V_T$  и, согласно свойствам циклоиды,  $V_T$  будет характеризовать взаимодействие контактирующих поверхностей колеса и рельса. В этом случае скорость взаимодействия будет определена по уравнению:

$$V_A = V_T = \frac{2\pi r}{2t} \cdot \sqrt{2}. \quad (5)$$

Движение условной точки А, принадлежащей топологическому кругу катания колеса, с позиции классической механики в декартовой системе координат представим выражениями:

$$\begin{cases} x = A_0 \cdot m = V_0 \cdot t - R \cdot \sin \frac{V_0}{R} \cdot t; \\ y = A \cdot m = R - R \cdot \cos \frac{V_0}{R} \cdot t. \end{cases} \quad (6)$$

Проекции скорости точки А на координатные оси определяют по выражению:

$$\begin{cases} V_x = \dot{x} = V_0 \cdot \left(1 - \cos \frac{V_0 \cdot t}{R}\right); \\ V_y = \dot{y} = V_0 \cdot \sin \frac{V_0 \cdot t}{R} \end{cases} \quad (7)$$

или как производные пути по времени:

$$\begin{cases} \dot{x} = 2V_o \cdot \sin^2 \frac{V_o \cdot t}{R}; \\ \dot{y} = 2V_o \cdot \sin \frac{V_o \cdot t}{R} \cdot \cos \frac{V_o \cdot t}{R}. \end{cases} \quad (8)$$

Модуль скорости  $V_A$  условной точки А, совершающей движение по траектории циклоиды, в соответствии с ее свойствами, вычисляется по выражению:

$$2V_o \left| \sin \frac{V_o \cdot t}{2R} \right|, \quad (9)$$

а направление вектора скорости  $V_A$  определяется тангенсом угла наклона касательной к циклоиде в точке А:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \operatorname{ctg} \frac{V_o \cdot t}{2R}. \quad (10)$$

Проекция ускорения на оси координат находят дифференцированием по времени уравнений (7):

$$\begin{cases} a_x = \ddot{x} = \frac{V_o^2}{R} \cdot \sin \frac{V_o \cdot t}{R}; \\ a_y = \ddot{y} = \frac{V_o^2}{R} \cdot \cos \frac{V_o \cdot t}{R}. \end{cases} \quad (11)$$

Отсюда модуль ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \frac{V_o^2}{R}. \quad (12)$$

Векторы ускорений всегда направлены к центру круга, а в процессе качения колеса реакция рельса будет направлена по ТО, т. е. по радиусу производящего круга к центру оси колеса.

В свою очередь дифференциальные уравнения плоскопараллельного движения колеса имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_o = \sum_{k=1}^n F_{kx}^e; \\ M\ddot{y}_o = \sum_{k=1}^n F_{ky}^e; \\ J_o \ddot{\varphi} = \sum_{i=1}^n m_o (F_i^e), \end{cases} \quad (13)$$

где  $M$  – масса тела (колеса);

$F_{kx}^e, F_{ky}^e, F_i^e$  – внешние силы;

$J_o$  – момент инерции тела (колеса);

$\ddot{\varphi}$  – угловое ускорение тела (колеса);

$m_o$  – момент сопротивления качения относительно центра  $O$  круга.

Таким образом, дифференциальные уравнения (13) позволяют аналитически и абсолютно корректно решать как прямые, так и обратные задачи динамики подвижного состава.

На основании изложенного можно сделать выводы.

Адаптация новой парадигмы, базисом которой является фундаментальная теория циклоидальных кривых, дает возможность определять кинематические параметры железнодорожных

колес и обоснованно нормировать динамические процессы и механизмы взаимодействия колес с рельсами, в частности:

использовать ранее не учитывавшиеся принципиальные технические и параметрические зависимости между колесными парами подвижного состава (как голономными системами) и рельсовой колеей;

выполнять исследования процессов взаимодействия колес и рельсов с математической корректностью, достоверностью и обоснованностью;

обоснованно применять результативные методы решения проблем, явлений и барьерных мест в направлении совершенствования и повышения эксплуатационной эффективности железнодорожного транспорта;

на длительное время привлечь к исследованиям по взаимодействию железнодорожного подвижного состава с рельсовой колеей ученых из других направлений;

не применять принципиально противоречивые трактовки при описании статических и динамических процессов взаимодействия рельсовой колеи и колесных пар подвижного состава;

снизить влияние конструкторских нормативов при проектировании экипажей подвижного состава из-за отсутствия расчетных установленных соотношений их параметров и рельсовой колеи;

обозначить подходы к одинаковому пониманию методов управления процессом износа бандажей колес и снизить высокую стоимость непродолжительного периода жизненного цикла колесных пар отечественного подвижного состава;

повысить уровень гарантий безопасности движения, снизив показатель риска безопасности движения подвижного состава железнодорожного транспорта.

### Список литературы

1. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
2. Митрохин, А. Н. «Колесо – рельс»: требуется более совершенная теория [Текст] / А. Н. Митрохин // Железнодорожный транспорт / ОАО «Российские железные дороги». – М., 1998. – № 7. – С. 41 – 44.
3. Klingel, H. Uber den Lauf der Eisenbahnwagen auf geraden Bahn. Organ fur Fortschritte des Eisenbahnwesens / H. Klingel // Neue Folge. XX Band. – Braunschweig, 1983. – № 4. – P. 113 – 123.
4. Петров, Н. П. Давление колес на рельсы железных дорог, прочность рельсов и устойчивость пути [Текст] / Н. П. Петров. – Петроград, 1915. – 263 с.
5. Кинематика, статика, динамика точки [Текст] / Под ред. А. П. Котельникова. – М.-Л.: Оборонгиз, 1939. – 403 с.
6. Карташев, Н. И. Тяговые расчеты при эксплуатации железных дорог [Текст] / Н. И. Карташев. – Томск, 1928. – 148 с.
7. Механика Леонардо да Винчи [Текст] / Под ред. С. И. Вавилова / АН СССР. – М., 1947. – 824 с.
8. Берман, Г. Н. Циклоида [Текст] / Г. Н. Берман. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 116 с.
9. Физический энциклопедический словарь [Текст] / Под ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
10. Новачук, Я. А. Инновационная теория взаимодействия колес и рельсов [Текст] / Я. А. Новачук, В. Г. Григоренко, Д. Н. Никитин // Путь и путевое хозяйство / ОАО «Российские железные дороги». – М., 2009. – № 2. – С. 22 – 26.

### References

1. Verigo M. F. *Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava* (Way and railway vehicles interaction). Moscow: Transport, 1986, 559 p.
2. Mitrohin A. N. «Wheel–rail»: more perfect theory is required [«Koleso–rel's»: Trebuetsia bolee sovershennaia teoriia]. *Zheleznodorozhnyy transport – Rail transport*, 1998, no. 7, pp. 41 – 44.

3. Klingel H. *Über die Lauf der Eisenbahnuragen auf Bahn. Orgain für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung, Neue Folge. XX Band*, Braunschweig, 1883, no. 4, pp. 113 – 123.
4. Petrov N. P. *Davlenie koles na rel'sy zheleznykh dorog, prochnost' rel'sov i ustoichivost' puti* (Pressure of wheels on rails of railroad communications, strength of rails and stability of a way). Petrograd, 1915, 263 p.
5. Zhukovskij N. E. *Kinematika, statika, dinamika tochki* (Kinematics, statics, dynamics of a point). Moscow: OBORONGIZ, 1939, 403 p.
6. Kartashev N. I. *Tiagovye raschety pri ekspluatatsii zheleznykh dorog* (Thrust calculations at railway operation). Tomsk, 1928, 148 p.
7. Gukovsky M. A. *Mekhanika Leonardo da Vinchi* (Mechanics Leonardo da Vinci). Moscow: AN USSR, 1947, 824 p.
8. Berman G. N. *Tsikloida* (Cycloid). Moscow: GITTL, 1954, 116 p.
9. Prohorova A. M. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'* (The physical encyclopaedic dictionary). Moscow: The Soviet encyclopaedia, 1984, 944 p.
10. Novachuk J. A., Grigorenko V. G., Nikitin D. N. The innovative theory of interaction of wheels and rails [Innovatsionnaia teoriia vzaimodeistviia koles i rel'sov]. *Put' i putevoe hozjajstvo – Way and travelling facilities*, 2009, no. 2, pp. 22–26.

УДК 629.424:621.001.5

С. М. Овчаренко, В. А. Минаков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В МОТОРНОМ МАСЛЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ Д49

*Процесс эксплуатации тепловозного дизеля связан с постепенным износом деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Периодическая безразборная оценка степени изношенности деталей этих групп возможна при применении метода, основанного на анализе контроля текущих значений концентрации продуктов износа. Одной из основных задач при реализации этого метода является задача оценки количества металла, изношенного с контролируемых деталей, по результатам анализа текущих значений концентрации продуктов износа. В статье приведены методика расчета и результаты моделирования работы системы очистки моторного масла дизеля типа Д49.*

Задача повышения надежности работы тепловозов в процессе эксплуатации является одной из наиболее актуальных на современном этапе. Дизель является одним из наименее надежных узлов тепловоза. На его долю приходится более 40 % отказов и неплановых ремонтов. Применение эффективных методов диагностирования в процессе эксплуатации позволяет значительно повысить надежность работы дизеля и, соответственно, снизить эксплуатационные расходы.

Лимитирующими деталями при назначении межремонтных сроков являются детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Организация периодического безразборного контроля степени износа деталей этих групп создает условия перехода на организацию ремонта по техническому состоянию.

Одним из наиболее эффективных методов безразборной оценки технического состояния дизеля в процессе эксплуатации является метод, основанный на использовании результатов спектрального анализа моторного масла. При работе дизеля в результате механического изнашивания частички металла попадают в моторное масло, которое подводится ко всем трущимся деталям дизеля. Постепенно в смазочном материале повышается концентрация продуктов износа, значение которой характеризует степень изношенности деталей. При оценке технического состояния деталей по текущим значениям концентрации продуктов износа необходимо решить ряд задач, определяемых спецификой работы тепловозного дизеля. Во-первых, в процессе эксплуатации дизеля происходит перераспределение попавших в мотор-

ное масло частичек металла, в результате чего только часть изношенного металла формирует текущее значение замеренной концентрации продуктов износа. Во-вторых, в процессе эксплуатации дизеля первоначальный объем моторного масла подвержен влиянию таких факторов, как угар, утечка по неплотностям, полная замена масла по физико-химическим параметрам. В-третьих, материалы различных групп деталей в большинстве случаев содержат одинаковые химические элементы. Например, железо поступает в моторное масло при износе цилиндрических втулок, компрессионных колец, поршневых пальцев, шеек коленчатого вала (таблица 1). Таким образом, при разработке диагностической модели необходимо провести теоретические исследования и разработать модель процесса формирования значения концентрации продуктов износа в моторном масле тепловозного дизеля.

В результате анализа химического состава материала деталей (см. таблицу 1) установлен перечень контролируемых элементов, необходимый для реализации алгоритма разделения продуктов износа по группам контролируемых деталей. Так, для дизеля типа Д49 необходим контроль концентрации следующих девяти элементов: железо (Fe), медь (Cu), олово (Sn), свинец (Pb), кремний (Si), магний (Mg), никель (Ni), молибден (Mo), хром (Cr) [1,2].

Таблица 1 – Поступление элементов в моторное масло с деталей ЦПГ и КШМ дизеля Д49

Наименование детали	Химический элемент															
	Fe	S	P	Mn	Si	C	Sn	Pb	Na	Mg	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	
Шейки коленчатого вала	+	+	+	+	+	+			Попадает в моторное масло из охлаждающей воды			+	+		+	
Заливка вкладышей			+				+	+							+	
Гильза цилиндра	+	+	+	+	+	+					+		+		+	
Поршневой палец	+			+	+	+							+	+		
Поршень												+				+
Бронзовые втулки			+				+	+							+	
Компрессионные кольца	+	+	+		+	+	+					+				

На рисунке 1 представлена схема массообмена в картере дизеля, анализ параметров которой позволяет максимально учесть все возможные варианты развития процесса накопления продуктов износа в моторном масле дизеля.

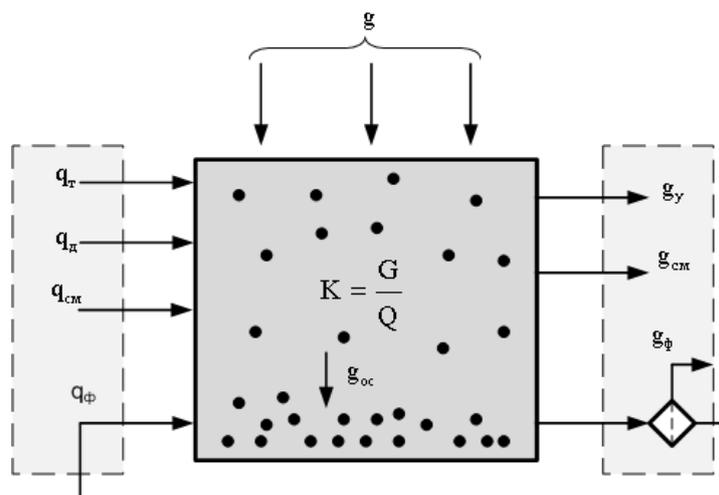


Рисунок 1 – Схема массообмена в картере дизеля:  $g$  – интенсивность поступления продуктов износа в моторное масло;  $g_y$  – интенсивность удаления продуктов износа с угаром или утечкой масла;  $g_{см}$  – интенсивность потерь со сменой масла;  $g_{ф}$  – интенсивность осаждения в системе очистки;  $g_{ос}$  – интенсивность осаждения металла на стенки картера и трубопровода;  $q_{см}$  – поступление примесей в масло при смене смазочного материала;  $q_{д}$  – поступление примесей при доливе масла;  $q_{т}$  – поступление топлива в картер при неисправной системе топливной аппаратуры

Определение значения концентрации продуктов износа в моторном масле дизеля осуществляется с помощью спектрометров. В лабораториях спектрального анализа компании ОАО «РЖД» наиболее распространены спектрометры типа МФС-7, МФС-11, ДФС-71 с функциями определения различных химических элементов. Проведение самого анализа занимает порядка пяти минут с возможностью определения концентрации до 24 химических элементов одновременно.

В соответствии со схемой массообмена (см. рисунок 1) частички металла, отрывающиеся от поверхности детали, попадают в моторное масло и начинают циркулировать в нем. Чем больше частичек металла оторвалось от деталей, тем больше износ деталей и соответственно должна увеличиться концентрация металла в моторном масле. Таким образом, следовало бы предположить, что, периодически фиксируя возрастающее значение концентрации продуктов износа, можно оценить текущую степень износа деталей. Однако в процессе эксплуатации тепловозного дизеля наиболее вероятна, как пример, динамика концентрации продуктов износа, представленная на рисунке 2 [2, 3].

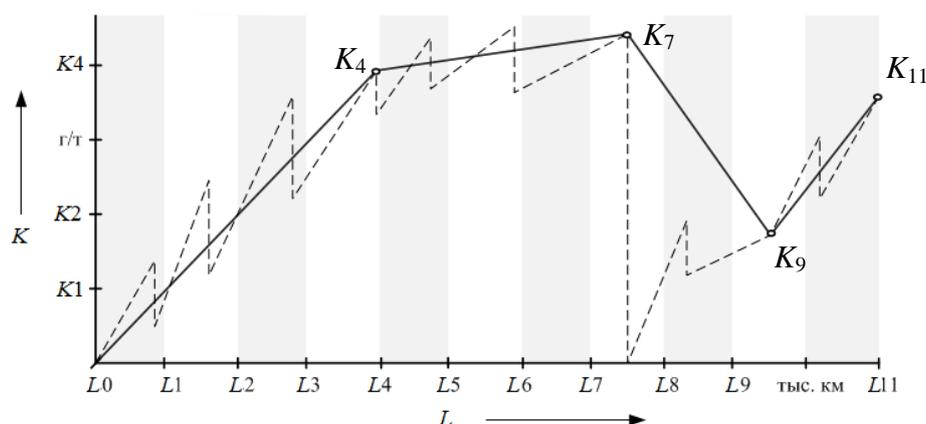


Рисунок 2 – Пример динамики замеренных и промежуточных значений концентрации продуктов износа в моторном масле: — — — — — замеренные; - - - - - промежуточные.

Значения  $K_4$ ,  $K_7$ ,  $K_9$ ,  $K_{11}$  получены по результатам спектрального анализа проб моторного масла. Промежуточные значения концентрации продуктов износа, показанные на рисунке 2 пунктирной линией, формируются в процессе эксплуатации с учетом долива и смены моторного масла. Таким образом, замеренное значение концентрации продуктов износа может с течением времени увеличиваться, оставаться неизменным или уменьшаться. Задача моделирования процесса накопления продуктов износа в моторном масле заключается в расчете промежуточных значений концентрации по известным (замеренным) значениям и в определении количества металла, изношенного с деталей.

Общее количество металла за интервал от начала эксплуатации до момента контроля рассчитывается по формуле, г:

$$G = G_k + G_{уг} + G_{см} + G_{ф} + G_{ос}, \quad (1)$$

где  $G_k$  – количество металла, находящегося в масле на момент контроля, г;

$G_{уг}$  – количество металла, потерянного на угар и унос масла, г;

$G_{см}$  – количество металла, потерянного со сменой масла, г;

$G_{ф}$  – количество металла, задержанного фильтрами, г;

$G_{ос}$  – количество металла, осевшего на стенках картера и трубопровода, г.

Количество металла, находящегося в масле на момент контроля, г,

$$G_k = K_N (Q_0 - g_y (L_N - L_{N-1})), \quad (2)$$

где  $K_N$  – концентрация металла в масле на момент контроля, г/т;

$g_y$  – интенсивность удаления продуктов износа с потерями масла, т/км;

$N$  – номер последнего контроля концентрации продуктов износа;

$Q_0$  – начальный объем масла в системе дизеля, т;

$L_N$  – наработка дизеля на момент контроля, км;

$K_{N-1}$  – наработка дизеля на момент предыдущего контроля (объем масла восстанавливается до  $Q_0$ ), км.

Расчет количества потерянного металла с маслом на угар и потери через неплотности по интервалам доливов [2]:

$$G_{\text{уг}} = (K_{Z_{j-1}+1} + K_{Z_{j-1}} (Q_0 - \frac{Q_{Z_{j-1}}^{(\text{дол})}}{Q_0}) / 2 \cdot Q_{Z_{j-1}}^{(\text{дол})} (1 - \frac{L_{Z_j} - L_{Z_{j-1}+1}}{L_{Z_j} - L_{Z_{j-1}}})) + \sum_{K=Z_{j-1}+1}^{Z_j} ((K_N + K_{N-1}) / 2 \cdot Q_{Z_{j-1}}^{(\text{дол})} \frac{L_{Z_j} - L_{K-1}}{L_{Z_j} - L_{Z_{j-1}}}), \quad (3)$$

где  $j$  – порядковый номер долива или смены масла;

$Z_j$  – номер технического обслуживания, соответствующий  $j$ -му номеру долива;

$K_{Z_j}$  – концентрация продуктов износа на  $Z$ -м техническом осмотре, г/т;

$Q_{Z_j}^{(\text{дол})}$  – количество долива или смены масла на  $Z$ -м техническом осмотре, т;

$L_{Z_j}$  – наработка дизеля на момент  $Z_j$ -го технического обслуживания, км.

Количество металла, потерянного при смене масла, г,

$$G_{\text{см}} = \sum_{j=1}^{N_s} K_j (Q_0 - Q_{\text{уг}}), \quad (4)$$

где  $K_{Z_j}$  – концентрация продуктов износа на момент  $j$ -й смены моторного масла;

$Q_{\text{уг}}$  – количество моторного масла, потерянного на угар за период от предшествующего долива.

Количество металла, задержанного фильтрами, г [2],

$$G_{\text{ф}} = \sum_{i=1}^N X_1 X_2 [K_i + K_{i-1} (Q_0 - Q_{i-1}^{(\text{дол})}) / Q_0] / 2, \quad (5)$$

где  $i$  – порядковый номер контроля концентрации;

$X_1$  – коэффициент, характеризующий зависимость количества отфильтрованного металла от среднего значения концентрации изношенного металла за период между проверками (контролем) концентрации;

$X_2$  – коэффициент, учитывающий влияние плотности металла на коэффициент отсева.

Коэффициент  $X_1$  определяется по формуле:

$$X_1 = \frac{G'_{\text{ф}}}{\sum_{i=1}^N K_{\text{ср}}^{(i)}}, \quad (6)$$

где  $G'_{\text{ф}}$  – количество металла, задержанного фильтрами за период между проверками, г;

$K_{\text{ср}}^{(i)}$  – средние значения концентрации за периоды между контрольными точками, г/т.

Значение коэффициента  $X_1$  устанавливается в опытным порядке и в дальнейшем используется в модели.

Для определения количества металла, задержанного фильтрами за период между проверками (контролем) рассмотрим расчетную схему фильтрации моторного масла для дизеля типа Д49 (рисунок 3).

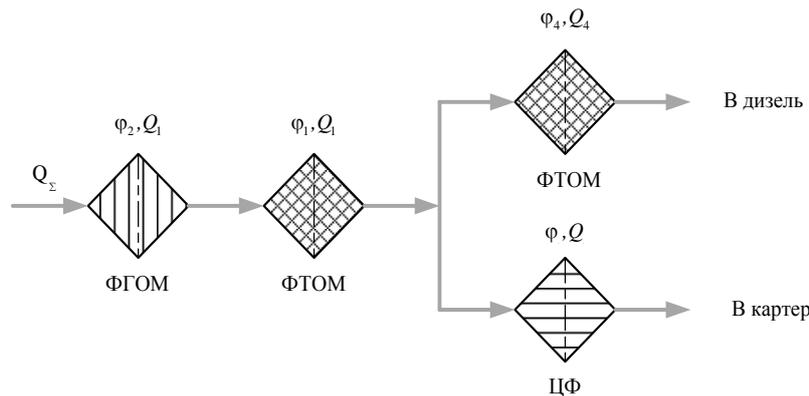


Рисунок 3 – Расчетная схема фильтрации моторного масла дизеля Д49

Значение  $G'_\phi$  за расчетный период определяется по формуле, г:

$$G'_\phi = \varphi_\Sigma \cdot Q_\Sigma \cdot K_{cp}, \quad (7)$$

где  $\varphi_\Sigma$  – суммарный коэффициент отсева.

$Q_\Sigma$  – количество масла, проходящего через систему отсева.

В соответствии со схемой фильтрации значение суммарного коэффициента отсева рассчитывается по формуле [2]:

$$\varphi_\Sigma = 1 - (1 - \varphi_2 \frac{Q_2}{Q_\Sigma})(1 - \varphi_1 \frac{Q_1}{Q_\Sigma})(1 - \varphi_4 \frac{Q_4}{Q_\Sigma} + \varphi_3 \frac{Q_3}{Q_\Sigma}). \quad (8)$$

В таблице 2 приведены параметры фильтрующих элементов, применяемых в конструкции фильтров дизеля Д49.

Таблица 2 – Параметры фильтров очистки масла дизеля типа Д49

Параметр	Значение показателя
Фильтр тонкой очистки:	
тип фильтрующего материала	Синтетический
фильтрующий материал	«Нарва-6»
расход масла через фильтр $Q_1$ , м <sup>3</sup> /ч	110,0
среднефракционный коэффициент отсева $\varphi_1$	0,145
Фильтр грубой очистки:	
тип фильтра	Сетчатый дисковый
расход масла через фильтр $Q_2$ , м <sup>3</sup> /ч	105
среднефракционный коэффициент отсева $\varphi_2$	0,05
Центробежный фильтр:	
тип привода	Механический
расход масла через фильтр $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч	5
среднефракционный коэффициент отсева $\varphi_3$	0,4
Объем масла в системе $V$ , м <sup>3</sup>	1,453
Средняя скорость угара масла $Q_v$ , м <sup>3</sup> /ч	0,006

Детали тепловозного дизеля изготовлены из различных материалов, имеющих различия в плотности, твердости, структуре и т. д. Поэтому процесс изнашивания таких деталей сопровождается некоторыми закономерностями, оказывающими влияние на отсев частичек на фильтрующих элементах. В разработанной модели в качестве основной характеристики материала принята его плотность. При проведении экспериментов [2] получено уравнение регрессии, характеризующее зависимость коэффициента  $X_2$  от плотности материала:

$$X_2 = -3,377\rho + 0,661, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность материала, г/мм<sup>3</sup>.

Количество металла, осевшего на стенках картера и трубопроводов ( $G_{ос}$ ), установить сложно, поэтому в модели накопления на основании исследований [4] оно принимается равным 5 % от общего объема металла, изношенного с деталей.

Таким образом, предложенная модель расчета количества металла, изношенного с деталей дизеля, позволяет по промежуточным значениям концентрации оценить степень износа деталей в процессе эксплуатации безразборным методом.

## Список литературы

1. ГОСТ 20759-90. Техническое диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса методом спектрального анализа масла [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 24 с.
2. Овчаренко, С. М. Моделирование работы и оценка эффективности систем очистки моторного масла различных серий тепловозов [Текст] / С. М. Овчаренко // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2008. – № 1. – С. 21 – 27.
3. Чанкин, В. В. Динамика изменения концентрации примесей в дизельных маслах [Текст] / В. В. Чанкин, Э. А. Пахомов // Вестник ВНИИЖТа / Научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. – М., 1964. – № 6. – С. 31 – 34.
4. Григорьев, И. Б. Износ и долговечность автомобильных двигателей [Текст] / И. Б. Григорьев, Н. И. Пономарев. М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.

## References

1. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie i prognozirovaniye ostatochnogo resursa metodom spectralnogo analiza masla, GOST 20759-90* (Technical diagnostics and prediction of the residual life of the method of spectral analysis of oil, State Standart). Moscow, Standarty, 1991, 24 p.
2. Ovcharenko S. M. Modeling and evaluating the effectiveness of cleaning the engine oil of various series of locomotives [Modelirovanie raboti i ocenka effektivnosti sistem ochistki motor-nogo masla razlichnikh seriy teplovozov]. *Vestnik RGUPS – Herald RSTU*, 2008, no. 1, pp. 21 – 27.
3. Chankin V. V., Pakhomov E. A., Dynamics of changes in the concentration of impurities in diesel oils [Dinamika izmeneniya koncentracii primesey v dizelnykh maslakh]. *Vestnik VNIIZhT – Herald VNIIZhT*, 1964, no. 6, pp. 31 – 34.
4. Grigorev I. B., Ponomarev N. I. *Iznos i dolgovechnost avtomobilnykh dvigateley* (Wear and durability of automobile engines). Moscow, 1976, 248 p.

УДК 629.424.001.57

Е. И. Сквородников, А. С. Анисимов, Ю. Б. Гришина

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЯХ

Основным направлением снижения эксплуатационных расходов на тягу поездов является уменьшение затрат на топливно-энергетические ресурсы, снижение ремонтных расходов за счет повышения показателей эксплуатационной надежности энергетических установок дизельного подвижного состава. Очевидно, что решение этих проблем в настоящее время, когда эксплуатационная экономичность дизелей и их надежность находятся на пределе для сложившихся условий эксплуатации и производства дизельных локомотивов, возможно за счет применения альтернативных видов топлива, использование которых позволит повысить как надежность дизельного подвижного состава, так и его экономичность в условиях эксплуатации. Одним из таких альтернативных видов топлива может быть либо природный газ, либо бытовой нефтяной газ, т. е. смесь бутана и пропана в различных соотношениях. В настоящей статье на базе математических моделей показана возможная экологическая и экономическая эффективность использования смесевых видов топлива на примере тепловозного дизеля 2А-5Д49.

Проблема экономии жидкого нефтяного топлива остается одной из самых актуальных в обеспечении народного хозяйства России топливно-энергетическими ресурсами. Увеличение

потребления жидкого топлива, связанное с развитием производственных и социальных отношений в стране, сопровождается истощением освоенных и удобно расположенных нефтяных месторождений. Освоение новых месторождений, расположенных в труднодоступных районах, приводит к удорожанию как сырой нефти, так и получаемых из нее нефтепродуктов.

Между тем имеются достаточно большие запасы высококачественного моторного топлива, не требующего для использования в двигателях внутреннего сгорания никакой дополнительной химической переработки. Одним из таких видов топлива является газовое топливо: сжатый и сжиженный бытовой (бутан-пропановая смесь), попутный нефтяной и природный газ.

Газовое топливо, имеющее высокие антидетонационные свойства, благоприятные условия смесеобразования и широкие пределы воспламенения в смеси с воздухом, обеспечивает высокие технико-экономические показатели двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Мировой опыт применения газовых видов топлива в энергетических установках на транспорте, мотор-генераторах и т. д. дает основание для широкомасштабного внедрения их в различные сферы энергетики.

Перевод современных тепловозных двигателей на газовое топливо или на смесевые виды топлива (смесь дизельного топлива с каким-либо газом) является процессом достаточно длительным и трудоемким. Замена части жидкого топлива (например, дизельного) на газообразное требует решения ряда принципиальных задач, а именно:

- анализа динамики термодинамических параметров рабочего цикла дизеля, работающего на смесевом топливе при изменении нагрузочных режимов;

- изменения, при необходимости, конструкции цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизеля, связанного с особенностями сгорания топливной смеси с учетом динамических и термических напряжений деталей ЦПГ;

- некоторого изменения конструкции элементов топливной аппаратуры и системы, управляющей ее работой;

- модернизации системы регулирования частоты вращения коленчатого вала и мощности дизеля с учетом специфики применяемого топлива и конструктивных особенностей топливоподающей аппаратуры;

- учета требований техники безопасности при применении газообразного топлива и условий, в которых работает дизель на смесевом виде топлива.

В двигателе, который может работать на дизельном топливе и смеси его с каким-либо газом, эти задачи можно решить либо созданием специальных систем для подачи каждого из видов топлива, либо применением топливной аппаратуры, управляющей составом смеси путем изменения количества подаваемого воздуха и топлива.

При конвертировании существующих дизельных двигателей для работы на смесевом виде топлива его воспламенение осуществляется от источника зажигания, в качестве которого используется запальная доза жидкого дизельного топлива. До настоящего времени в газовых двигателях не нашел применения метод воспламенения от сжатия, используемый в дизелях. Основным затруднением в этом случае является высокая температура самовоспламенения природного и нефтяного газа (650 – 700 °С), значительно превышающая температуру самовоспламенения дизельного топлива (320 – 380 °С).

В качестве значительного приближения к такому процессу можно рассматривать процесс, в котором осуществляются впрыск газового топлива в цилиндр двигателя в конце процесса сжатия и его воспламенение запальной дозой дизельного топлива, количество которой не превышает 20 % циклового расхода, что позволяет использовать дизели степени без изменения сжатия и конструкции топливной аппаратуры.

Разработка высокоэффективных способов организации рабочих процессов при сжигании смеси дизельного топлива и природного газа, определения путей дальнейшего уменьшения количества токсичных элементов в продуктах сгорания, повышения топливной экономичности и надежности деталей и узлов дизеля в перспективных двигателях является и в настоящее время актуальной задачей.

При применении запального жидкого топлива для воспламенения газозвдушной смеси используется штатная топливная аппаратура дизеля, обеспечивающая возможность работы двигателя на двух видах топлива. В этом случае расход жидкого топлива не может быть ниже расхода топлива, соответствующего малым нагрузкам дизеля, на которых работа дизеля осуществляется только на жидком, дизельном топливе.

Кроме того, при переводе дизелей на газообразное топливо усложняется процесс регулирования нагрузки, так как чисто качественное регулирование, имеющее место в дизелях, в данном случае невозможно и требуются разработка и применение устройств, регулирующих количество подаваемого газа.

При создании двигателей, работающих по газодизельному циклу (ГДЦ), возникают трудности с организацией подачи в цилиндр двух видов топлива, причем при уменьшении дозы запального топлива до минимально возможной необходимо обеспечить гарантированное воспламенение топливозвдушной смеси без пропусков. Наиболее отлаженный путь, применяемый в существующих в настоящее время газодизельных двигателях, – это подача запальной дозы топлива в цилиндр двигателя через штатную топливную аппаратуру в количестве 15 – 20 % от величины номинального расхода. В этом случае дальнейшее увеличение мощности двигателя может достигаться за счет увеличения количества подаваемого в цилиндр газа.

Следует отметить, что окончательно величина запальной дозы топлива определяется экспериментальным путем по условиям стабильности воспламенения топлива в цилиндре дизеля для различных переменных режимов работы.

Практика использования газодизельного топлива в транспортных двигателях показала, что работа двигателей на газовом топливе обеспечивает лучшее смесеобразование, на 30 – 50 % повышается ресурс деталей двигателя, увеличивается срок службы моторного масла, снижается количество вредных выбросов в отработавших газах дизеля.

В общем случае в качестве газового топлива в двигателях внутреннего сгорания может использоваться три вида нефтяных газов.

*Пропан-бутановая смесь.* Пропан-бутановая смесь доступна по цене, имеет высокие энергетические и экологические показатели, удобна при хранении и транспортировке в сжиженном виде, обладает возможностью дальнейшей переработки, что обеспечивает довольно широкий спектр ее применения в качестве моторного топлива. Технические требования к данному виду топлива определены ГОСТ 20448-90. Элементарный состав пропан-бутановой смеси (50 % бутана  $C_4H_{10}$ , 50 % пропана  $C_3H_8$ ) определен ГОСТ 27578-87. Элементарный химический состав смеси: С = 0,822, Н = 0,178. Плотность при нормальных условиях – 2,5 кг/м<sup>3</sup>, низшая теплота сгорания – 103 МДж/м<sup>3</sup> (41200 кДж/кг).

*Попутный нефтяной газ.* Попутный нефтяной газ (ПНГ) – углеводородный газ, находящийся в нефтяных залежах в растворенном состоянии и выделяющийся из нефти при снижении давления. Основными составляющими ПНГ являются предельные углеводороды – гомологи метана от  $CH_4$  до  $C_6H_{14}$ , %: метан ( $CH_4$ ) 76,39, этан ( $C_2H_6$ ) 6,46, пропан ( $C_3H_8$ ) 7,82, изобутан (i- $C_4H_{10}$ ) 1,62, н-бутан (N- $C_4H_{10}$ ) 2,63, пентан ( $C_5H_{12}$ ) 1,2, гексаны и выше ( $C_6H_{14}$ ) 0,74, двуокись углерода ( $CO_2$ ) 1,15, азот ( $N_2$ ) 1,99. Плотность при 0 °С – 1,024 кг/м<sup>3</sup>, низшая теплота сгорания – 46,135 МДж/кг. Элементарный химический состав ПНГ рассчитан без учета содержания в нем двуокиси углерода и азота: С = 0,7388, Н = 0,2612. В зависимости от состава ПНГ его стоимость колеблется в интервале от 600 до 1200 р. за 1000 м<sup>3</sup> или от 0,586 до 1,172 р./кг.

*Природный газ.* Природный газ – это смесь газов, образовавшихся в недрах земли при анаэробном разложении органических веществ. Природный газ в пластовых условиях находится в газообразном состоянии – в виде отдельных скоплений (газовые залежи) или в виде газовой шапки нефтегазовых месторождений – либо в растворенном состоянии в нефти или воде. При нормальных условиях (101,325 кПа и 20 °С) природный газ находится только в газообразном состоянии.

Основную часть природного газа составляет метан ( $CH_4$ ) – до 98 %. В состав природного газа могут входить также более тяжелые углеводороды – гомологи метана: этан ( $C_2H_6$ ), пропан ( $C_3H_8$ ), бутан ( $C_4H_{10}$ ). В составе некоторых природных газов возможно содержание неуг-

леводородных элементов, таких как водород ( $H_2$ ), сероводород ( $H_2S$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ), азот ( $N_2$ ) и гелий ( $He$ ).

Физические характеристики зависят от состава газа и при нормальных условиях составляют: плотность – от 0,68 до 0,85 кг/м<sup>3</sup> (сухой газообразный) и 400 кг/м<sup>3</sup> (жидкий), температура самовозгорания – 650 °С, взрывоопасные концентрации смеси газа с воздухом – от 5 до 15 % по объему. Удельная теплота сгорания – 28 ÷ 46 МДж/м<sup>3</sup>. Для российских месторождений теплота сгорания природного газа  $H_u$  составляет 38231 кДж/м<sup>3</sup>, при плотности  $\gamma_{пр.г} = 0,717$  кг/м<sup>3</sup> теплота сгорания  $H_u = 53320$  кДж/кг. Октановое число при использовании в двигателях внутреннего сгорания составляет 120 – 130.

В экологическом отношении природный газ является самым чистым видом органического топлива – при его сгорании образуется значительно меньшее количество вредных веществ по сравнению с другими видами топлива.

На основании сказанного следует полагать, что применение смесевых видов топлива будет иметь существенное преимущество в условиях эксплуатации, если цена газовой добавки к дизельному топливу будет значительно ниже, чем цена дизельного топлива.

Кроме того, даже при равнозначности цены на топливо эффективность применения смесевых видов определится за счет улучшения экологических характеристик дизеля (уменьшение отчислений локомотивного депо на охрану окружающей среды) и повышения надежности работы деталей шатунно-поршневой группы дизельных двигателей [1, 2].

Методику оценки эксплуатационной топливной и экологической эффективности использования смесевых видов топлива в тепловозных дизелях покажем на примере тепловоза 2ТЭ70, работающего на выбранном полигоне эксплуатации по режимной карте, представленной в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры работы дизеля 2А-5Д49 по позициям контроллера машиниста тепловоза 2ТЭ70 на выбранном участке обращения

Позиция контроллера машиниста (КМ)	Параметры работы дизеля			
	$Ne$ , кВт	$n_d$ , мин <sup>-1</sup>	$be$ , кг/(кВт·ч)	$tr_i$ , ч
0	30	349	0,5979	4,37
1	162	407	0,5148	0,13
2	302	463	0,4541	0,22
3	452	517	0,4069	0,27
4	610	568	0,3689	0,40
5	777	618	0,3373	0,34
6	953	665	0,3106	0,32
7	1138	711	0,2878	0,34
8	1332	754	0,2680	0,57
9	1535	796	0,2520	0,60
10	1747	835	0,2384	0,80
11	1968	872	0,2275	0,44
12	2197	907	0,2194	0,34
13	2436	940	0,2140	0,19
14	2683	971	0,2116	1,29
15	2940	1000	0,2123	3,58

При оценке эксплуатационной эффективности работы тепловозов на различных видах топлива использованы теоретические модели и методы, разработанные на кафедре «Локомотивы» ОмГУПС и представленные в работах [1 – 3].

Согласно проведенным ранее исследованиям значения эффективной мощности энергетической установки ( $Ne_i$ , кВт), удельного расхода топлива ( $be_i$ , кг/(кВт·ч)) и частоты вращения коленчатого вала дизеля ( $n_{di}$ , мин<sup>-1</sup>) для каждой позиции контроллера машиниста при работе тепловоза на дизельном топливе определяются по выражениям:

$$Ne_i = Ne \cdot dNe_i = 2940 \cdot (0,001518Pk^2 + 0,0432Pk + 0,01); \quad (1)$$

$$be_i = be \cdot dbe_i = 0,210 \cdot (0,01033\text{Пк}^2 - 0,279\text{Пк} + 2,885); \quad (2)$$

$$n_{дi} = n_d \cdot dn_{дi} = 1000 \cdot (-0,001042\text{Пк}^2 + 0,059\text{Пк} + 0,350). \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3) обозначено:  $Ne$ ,  $be$ ,  $n_d$  – соответственно эффективная мощность, удельный расход топлива и частота вращения коленчатого вала дизеля при работе на номинальном режиме ( $\text{Пк} = 15$ );  $Ne_i$ ,  $be_i$ ,  $n_{дi}$  – эффективная мощность, удельный расход топлива и частота вращения коленчатого вала дизеля на  $i$ -й позиции контроллера машиниста.

Для номинального режима работы ( $\text{Пк} = 15$ ) согласно паспортным значениям принимаем:  $Ne = 2940$  кВт,  $be = 0,210$  кг/(кВт·ч),  $n_d = 1000$  мин<sup>-1</sup>. Результаты расчета по выражениям (1) – (3) представлены в таблице 1.

Для каждого серийного тепловоза эксплуатируемого парка депо значения  $Ne$ ,  $be$ , и  $n_d$  для номинального режима работы принимаются по результатам последних реостатных испытаний.

При работе тепловозного дизеля по газодизельному циклу полагаем, что величина запальной дозы дизельного топлива составляет 20 % от номинального расхода и остается практически неизменной для всех позиций контроллера машиниста. Как указано выше, увеличение мощности дизеля на 3-й и последующих позициях ( $i = 3 - 15$ ) достигается за счет увеличения количества подаваемого газа согласно зависимостям, представленным на рисунке 1. Как видно из приведенных зависимостей, неоднозначность отношения количества дизельного топлива к количеству газа приведет к изменению элементарного состава горючей смеси при переходе с одной позиции контроллера машиниста на другую. Тогда для каждой  $i$ -й позиции контроллера машиниста элементарный состав горючей смеси определяется по соответствующим выражениям:

$$C_{ГДЦ}^{(i)} = \frac{Вч_{д}^{(i)} \cdot C + Вч_{г}^{(i)} \cdot CC}{Вч_{д}^{(i)} + Вч_{г}^{(i)}}; \quad (4)$$

$$H_{ГДЦ}^{(i)} = \frac{Вч_{д}^{(i)} \cdot H + Вч_{г}^{(i)} \cdot HH}{Вч_{д}^{(i)} + Вч_{г}^{(i)}}; \quad (5)$$

$$O_{ГДЦ}^{(i)} = \frac{Вч_{д}^{(i)} \cdot O + Вч_{г}^{(i)} \cdot OO}{Вч_{д}^{(i)} + Вч_{г}^{(i)}}; \quad (6)$$

$$S_{ГДЦ}^{(i)} = \frac{Вч_{д}^{(i)} \cdot S + Вч_{г}^{(i)} \cdot SS}{Вч_{д}^{(i)} + Вч_{г}^{(i)}}, \quad (7)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $S$ ,  $O$  – элементарный состав дизельного топлива;  $CC$ ,  $HH$ ,  $SS$ ,  $OO$  – элементарный состав газового топлива;  $Вч_{д}^{(i)}$ ,  $Вч_{г}^{(i)}$  – соответственно часовой расход дизельного топлива и газа на  $i$ -й позиции контроллера машиниста, кг/ч.

Расчет часового расхода дизельного и газового топлива по позициям контроллера машиниста выполнен с учетом следующих условий:

1) расход дизельного топлива за один час работы дизеля на 0-й, 1-й и 2-й позициях определяется по выражению:  $Вч_{д}^{(i)} = Ne_i be_i$ ;

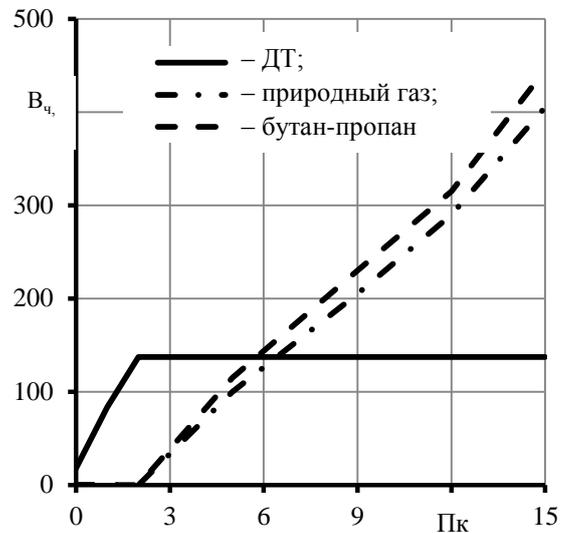


Рисунок 1 – Закон подачи дизельного и газового топлива при реализации газодизельного рабочего цикла в дизеле 2А–5Д49 (16ЧН 26/26)

2) если  $i > 3$ , то часовой расход дизельного топлива рассчитывается по выражению  $V_{\text{д}}^{(i)} = Ne_2 b_{\text{д}}^{(\text{зан})}$ , в котором  $Ne_2$  – мощность дизеля на второй позиции контроллера машиниста, а  $b_{\text{д}}^{(\text{зан})}$  – запальная доза дизельного топлива;

3) часовой расход газового топлива, у которого удельная теплота сгорания  $Hu^{(r)}$  для каждой  $i$ -й позиции контроллера машиниста ( $i > 3$ ) определяется по соотношению:

$$V_{\text{г}}^{(i)} = \frac{Ne_i b_e Hu^{(д)} - Ne_2 b_{\text{д}}^{(\text{зан})} Hu^{(д)}}{Hu^{(r)}}. \quad (8)$$

Тогда  $C_{\text{ГДЦ}}^{(i)}$ ,  $H_{\text{ГДЦ}}^{(i)}$ ,  $S_{\text{ГДЦ}}^{(i)}$ ,  $O_{\text{ГДЦ}}^{(i)}$  есть элементарный состав газодизельного топлива для каждой  $i$ -й позиции контроллера машиниста тепловоза. На рисунке 2 представлено изменение долевого состава топливной смеси, определенное согласно выражениям (4) – (7) по позициям контроллера машиниста. Как видно из рисунка 2, добавка к стандартному дизельному топливу природного газа, в состав которого входит в основном природный газ ( $\text{CH}_4$ ) или смеси 50 % бутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) и 50 % пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), приводит к уменьшению доли углерода и к увеличению доли водорода в составе топливной смеси. Заметно уменьшается в топливной смеси относительное количество кислорода и серы, что, с одной стороны, может вызывать снижение качества сгорания топлива, с другой стороны – снижение соединений серы и углерода в продуктах сгорания, что будет способствовать повышению надежности узлов и деталей дизеля. Снижение количества серы потребует применения в моторном масле присадок, способствующих повышению его смазывающих свойств.

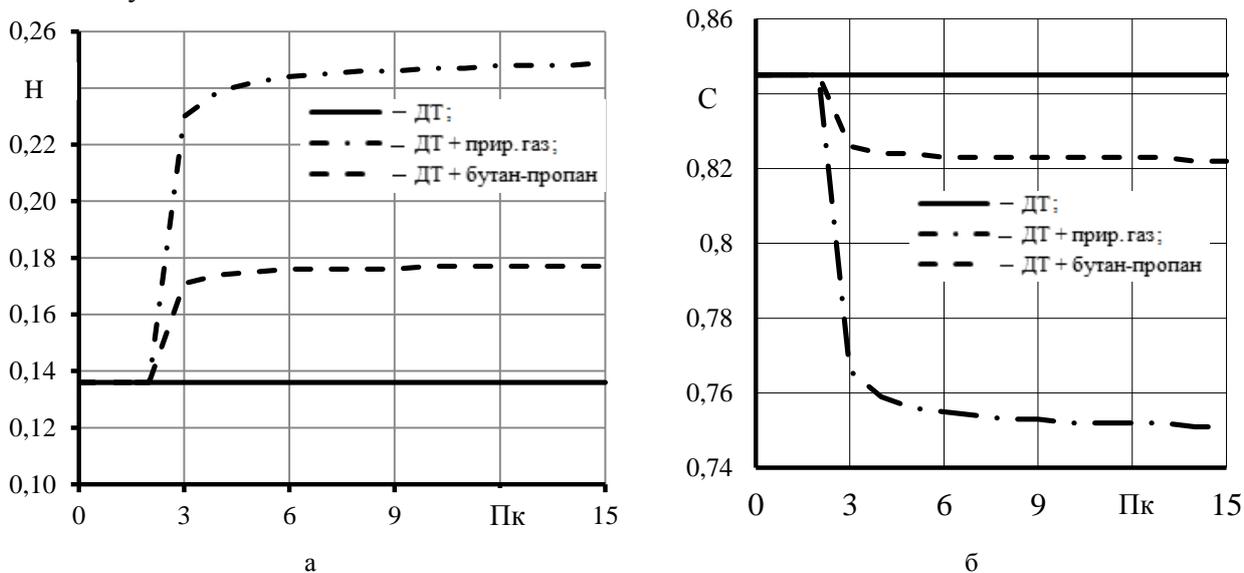


Рисунок 2 – Изменение содержания водорода (а) и углерода (б) в элементарном составе топливной смеси (в долях) по позициям контроллера машиниста

Очевидно, что изменение элементарного состава топливной смеси приведет к изменению удельной теплоты сгорания топлива и параметров выгорания топлива в цилиндре дизеля, что повлечет за собой изменение технико-экономических и экологических характеристик работы дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза.

По рассчитанным параметрам работы дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза (см. таблицу 1) определяется величина среднего эффективного давления рабочего цикла дизеля 2А-5Д49 для каждой позиции контроллера машиниста с использованием выражения, МПа

$$Pe_i = 0,565 \frac{Ne_i}{n_{di}}, \quad (9)$$

на основании которого корректируется величина удельного расхода дизельного топлива по позициям контроллера машиниста, кг/(кВт·ч),

$$be_i = 0,163Pe_i^2 - 0,518Pe_i + 0,623. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) целесообразно использовать при выполнении расчетов, когда мощность и частота вращения коленчатого вала дизеля на каждой  $i$ -й позиции контроллера машиниста не соответствуют нормативным значениям, приведенным в таблице 1.

По результатам предварительных исследований, представленных выше, определим количество тепла ( $Q_{\Sigma}$ , кДж), которое необходимо получить в дизеле при сгорании различных видов углеводородного топлива, чтобы реализовать в поездной работе тепловоза 2ТЭ70 режимную карту, приведенную в таблице 1.

При работе тепловоза на дизельном топливе

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{Пк} Q_{\Sigma_i} = \sum_{i=0}^{Пк} B\alpha_i tr_i Hu^{(a)}; \quad (11)$$

при работе тепловоза на смешанном виде топлива

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{Пк} Q_{\Sigma_i} = \sum_{i=0}^2 B\alpha_i tr_i Hu^{(d)} + \sum_{i=3}^{Пк} B\alpha_i^{(i)} tr_i Hu^{(r)}. \quad (12)$$

Результаты расчета по выражениям (11), (12) представлены в таблице 2, на основании данных которой можно заключить, что независимо от вида смешанного топлива, теплоемкости, составляющих его горючих элементов суммарное количество тепла должно соответствовать количеству тепла на каждой позиции контроллера машиниста, полученному при работе по дизельному циклу. Это условие необходимо соблюдать, и система регулирования подачи газа должна быть настроена так, чтобы мощность дизеля на каждой  $i$ -й позиции контроллера машиниста соответствовала нормативным, паспортным значениям.

По данным таблицы 2 с учетом теплоты сгорания того или иного вида топлива рассчитан его расход для каждой позиции контроллера машиниста с учетом достижения нормативной мощности дизеля на позиции; суммарный расход за поездку и с учетом стоимости различных видов топлива – денежные затраты при выполнении поездной работы.

Таблица 2 – Распределение тепла по позициям контроллера машиниста при сгорании различных видов углеводородного топлива при дизельном и газодизельном цикле

Позиция КМ	$Q_{\Sigma}$ , кДж	Распределение тепла (кДж) при реализации рабочих циклов дизеля 2А-5Д49				
		дизельный	газодизельный			
		дизельное топливо (ДТ)	дизельное топливо + природный газ		дизельное топливо + бутан-пропан	
			ДТ	СН <sub>4</sub>	ДТ	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> +С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>
0	3383599	3383599	3383599	0	3383599	0
1	461490	461490	461490	0	461490	0
2	1286227	1286227	1286227	0	1286227	0
3	2113594	2113594	1578551	535043	1578551	535043
4	3832989	3832989	2338594	1494394	2338594	1494394
5	3795523	3795523	1987805	1807718	1987805	1807718
6	4035031	4035031	1870875	2164156	1870875	2164156
7	4744524	4744524	1987805	2756719	1987805	2756719
8	8682239	8682239	3332497	5349742	3332497	5349742
9	9887704	9887704	3507891	6379813	3507891	6379813
10	14192913	14192913	4677189	9515725	4677189	9515725
11	8390880	8390880	2572454	5818426	2572454	5818426
12	6980707	6980707	1987805	4992902	1987805	4992902
13	4218785	4218785	1110832	3107952	1110832	3107952
14	31197630	31197630	7541967	23655663	7541967	23655663
15	95185660	95185660	20930419	74255241	20930419	74255241
Всего	$2,02 \cdot 10^8$	$2,02 \cdot 10^8$	60556000	$1,42 \cdot 10^8$	60556000	$1,42 \cdot 10^8$
			95185660		95185660	

Понятно, что эффективность применения газового топлива в тепловозных дизелях, или конвертирование серийных тепловозных дизелей для работы по газодизельному циклу, может быть доказана только тогда, когда известна истинная цена газового топлива. По данным открытых интернет-источников определена среднеевропейская цена природного газа – 300 ÷ 400 долларов за 1000 м<sup>3</sup> и экспортные цены на сжиженную бутан-пропановую смесь – 210 ÷ 340 долларов за 1000 кг.

Для оценки экономического эффекта принято: цена 1 кг природного газа с учетом его плотности – 15,6 р./кг; цена 1 кг сжиженного нефтяного газа – 9,42 р. Расчеты выполнены по средней стоимости газа. Результаты расчета с учетом времени работы тепловоза на каждой *i*-й позиции контроллера машиниста (см. таблицу 1) представлены в таблице 3.

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что конвертирование серийных тепловозных дизелей на работу по газодизельному циклу принесет экономический эффект, если стоимость газового топлива существенно ниже стоимости дизельного топлива. Однако в настоящее время в системе ценообразования не понятна динамика изменения цен как на дизельное топливо, так и на различные виды нефтяных газов.

Выполненные модельные расчеты показали, что применение бутан-пропановой смеси в качестве добавки к дизельному топливу позволит сократить до 50 % затрат на единицу выполненной работы, а применение природного газа – примерно на 44 %. Если учесть капитальные затраты на оснащение тепловозных дизелей газоподающей аппаратурой, затраты на разработку автоматизированной системы подачи газа, величину эксплуатационных расходов на обслуживание системы топливоподачи, то перевод серийных дизелей для работы по газодизельному циклу скорее всего не приведет к снижению эксплуатационных расходов.

Таблица 3 – Распределение количества топлива по позициям контроллера машиниста и суммарных затрат на энергоносители при работе дизеля по дизельному и газодизельному циклам

Позиция КМ	Расход топлива (кг) по позициям контроллера машиниста при реализации рабочих циклов дизелем 2А-5Д49					
	дизельный	газодизельный				
		ДТ	ДТ+СН <sub>4</sub>		ДТ+(С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> +С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> )	
			ДТ	СН <sub>4</sub>	ДТ	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> +С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>
0	78,66	79,43	0	79,43	0	
1	10,74	10,83	0	10,83	0	
2	29,9	30,19	0	30,19	0	
3	50,04	37,06	10,44	37,06	11,58	
4	90,28	54,90	29,16	54,90	32,34	
5	89,82	46,66	35,27	46,66	39,12	
6	94,54	43,92	42,23	43,92	46,83	
7	112,21	46,66	53,79	46,66	59,66	
8	204,99	78,23	104,38	78,23	115,77	
9	230,25	82,35	124,48	82,35	138,06	
10	335,42	109,80	185,66	109,80	205,93	
11	199,16	60,39	113,52	60,39	125,91	
12	164,34	46,66	97,42	46,66	108,05	
13	97,2	26,08	60,64	26,08	67,26	
14	726,82	177,05	461,55	177,05	511,92	
15	2210,29	491,34	1448,81	491,34	1606,92	
Итого, кг	4724,66	1391,55	2767,35	1391,55	3069,35	
Итого, р	142685	42025	<b>43171</b>	42025	<b>28913</b>	
Всего за поездку, р	142685	<b>85196</b>		<b>70938</b>		

### Список литературы

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

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

3. Фофанов, Г. А. Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта [Текст] // Труды ВНИИЖТа / Г. А. Фофанов, Д. Н. Григорович, А. С. Нестрахов / Научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. – М., 2008. – 143 с.

## References

1. Volodin A. I. Skovorodnikov E. I. Anisimov A. S. *Kompleksnyj analiz termodinamicheskikh, jekonomicheskikh i jekologicheskikh harakteristik teplovoznih dizelej v uslovijah jekspluatacii* (Complex analysis of thermodynamic, economic and ecological characteristics of diesel diesels under operating conditions). Omsk: Omsk institute of engineers of railway transport, 2011, 166 p.

2. Volodin A. I. *Metody ocenki tehničeskogo sostojanija, jekspluacionnoj jekonomičnosti i jekolo-gičeskoj bezopasnosti dizel'nyh lokomotivov* (Methods of an assessment of a technical condition, operational profitability and ecological safety of diesel locomotives). Moscow: JSC Zheldorizdat, 2007, 264 p.

3. Fofanov G. A., Grigorovich D. N., Nestrachov A. S. *Al'ternativnye vidy topliva na podvizhnom sostave zheleznodorozhnogo transporta: trudy VNIIZhT* (Alternative fuels for the rolling stock of railway transport: proceedings of VNIIZHT). Moscow: Research Institute of railway transport, 2008, 143 p.

УДК 621.313

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, А. С. Хлопцов

## ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В статье приведены результаты термографических исследований процесса нагревания деталей коллекторно-щеточного узла (КЩУ) электрических машин постоянного тока. Обоснованы диагностические параметры для оценки технического состояния КЩУ ТЭД: отношение изменения превышения температуры во времени и в пространстве.*

Надежность функционирования тяговых электродвигателей (ТЭД) подвижного состава является основой бесперебойной работы локомотивного парка. Статистика отказов ремонтного локомотивного депо Западно-Сибирской железной дороги свидетельствует о том, что тяговые электродвигатели серий ТЛ-2К1, ЭПД-810, СТК-810, ЭК-810 наиболее часто выходят из строя по причине пробоя и межвитковых замыканий обмотки якоря, выхода из строя моторно-якорных подшипников, а также неисправностей коллекторно-щеточного узла (КЩУ). Несмотря на использование в производстве различных технических и технологических решений количество отказов ТЭД по указанным причинам остается достаточно высоким. В работах [1 – 3] предложено использование разработанных средств технического диагностирования КЩУ ТЭД, представлено эффективное множество диагностических параметров для контроля технического состояния КЩУ [4]. Очевидно, что совершенствование методов достоверного диагностирования и оценки технического состояния элементов и узлов ТЭД является актуальной задачей при эксплуатации и ремонте тягового электроподвижного состава, в том числе магистральных электровозов [5].

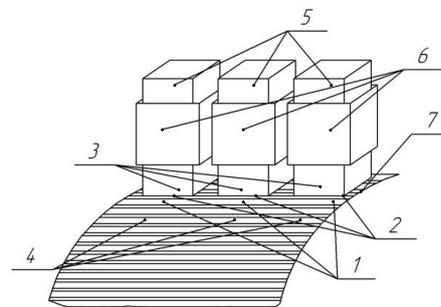


Рисунок 1 – Схема расположения точек контроля температуры КЩУ

Из статистики отказов, полученной в ремонтном локомотивном депо, следует, что пробой и межвитковые замыкания обмотки якоря составляют до 50 % от общего количества повреждений ТЭД. Следует отметить, что тепловой фактор является одним из определяющих для оценки технического состояния ТЭД, поскольку превышение температуры изоляции на каждые 10°C снижает ее ресурс в два раза. Помимо этого превышение температуры в контакте «коллектор – щетка» свидетельствует о возможном дефектном его состоянии. Поэтому для диагностирования ТЭД необходимо иметь объективную и достоверную информацию о распределении в нем температурного поля [6].



Рисунок 2 – Термограмма КЩУ МПТ ПЗ1М

«Иртис 2200С» и «Flir») проведены термографические исследования состояния КЩУ МПТ ПЗ1М. Температура регистрировалась в точках, указанных на рисунке 1.

Полученные термограммы (рисунок 2) подвергнуты обработке с целью получения информации для построения кривых превышения температуры в указанных точках коллекторно-щеточного контакта.

После изучения процесса нагревания деталей КЩУ МПТ ПЗ1М (рисунок 3) введено допущение о том, что исследуемый объект – однородное тело с равномерно распределенными потерями внутри его объема [8], при этом кривая нагревания описывается известным уравнением:

$$\tau = \tau_{\text{нач}} + (\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{нач}}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{нач}}$  – начальное превышение температуры машины;

$\tau_{\text{уст}}$  – установившееся превышение температуры;

$T_n$  – постоянная времени нагревания.

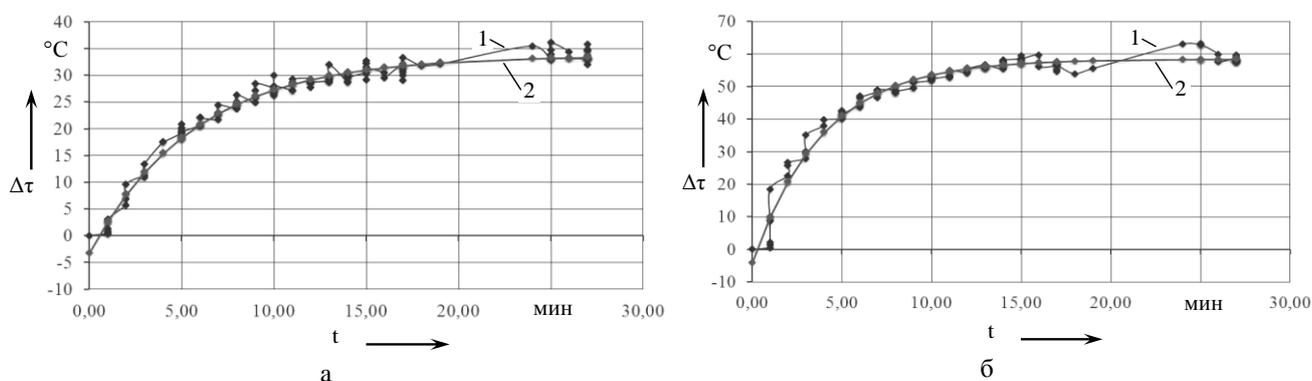


Рисунок 3 – Аппроксимация кривых превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) МПТ ПЗ1М:

1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимированная кривая

Получены аппроксимированные кривые превышения температуры коллектора и щеток исследуемой машины экспоненциальными функциями:

$$\Delta\tau_k = -36,924 \cdot e^{-0,18t} + 33,709; \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{щ} = -62,532 \cdot e^{-0,26t} + 58,48. \quad (3)$$

Поскольку наблюдение статической термограммы исследуемого объекта не информативно, произведены графические построения (рисунок 4) и найдены отношения полученных аппроксимирующих функций.

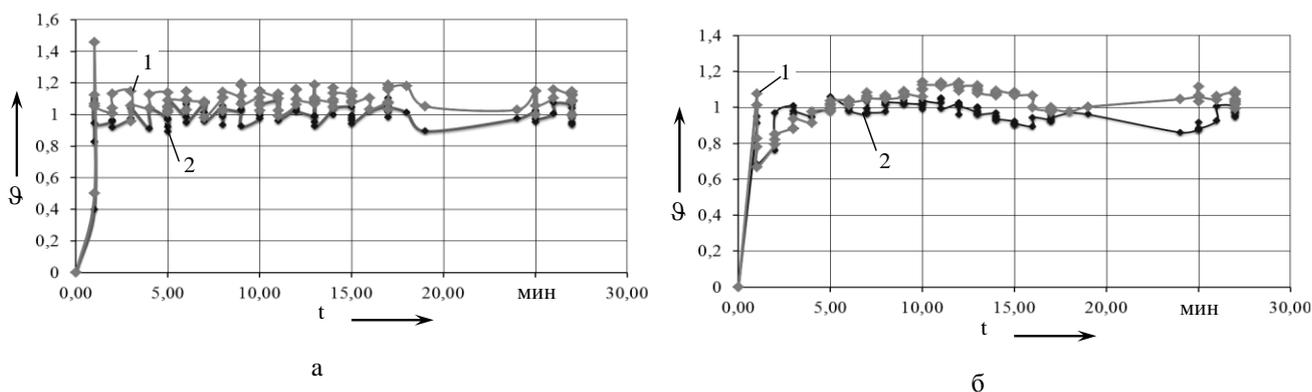


Рисунок 4 – График изменения отношения превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) МПТ ПЗ1М: 1 – отношение температуры второй щетки к первой; 2 – отношение температуры второй щетки к третьей

$$Q = \frac{\Delta\tau_i}{\Delta\tau_j}, \quad (4)$$

где  $\Delta\tau_i$  – превышение температуры в исправном контакте «коллектор – щетка»;  
 $\Delta\tau_j$  – превышение температуры в диагностируемом контакте «коллектор – щетка»;  
 $i = j = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  
 $n$  – количество зарегистрированных точек.

Анализ данных рисунка 4 показал, что отношения превышения температуры коллектора и щеток не имеют существенных различий как по времени, так и в пространстве, так как электродвигатель ПЗ1М был подвергнут испытанию после проведения капитального ремонта.

Для выявления параметров оценки технического состояния ТЭД проведены экспериментальные исследования на МПТ ПЗ1М с заранее внесенными неисправностями в коллекторно-щеточный контакт (рисунок 5).

Принимая температуру в исправном щеточном контакте за некое «эталонное» значение, рассчитали отношения превышения температуры нагрева (рисунок 6) эталонного следа к следам неисправных контактов «коллектор – щетка» (рисунок 7).

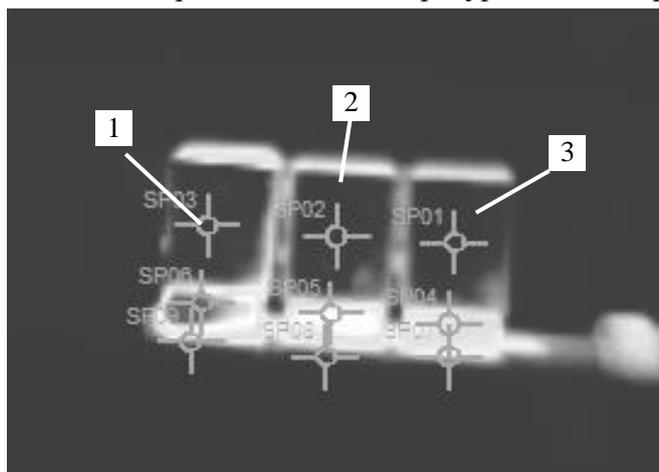


Рисунок 5 – Термограмма машины постоянного тока ПЗ1М с заранее внесенными неисправностями: 1 – уменьшено удельное давление на щетку; 2 – исправный щеточный контакт; 3 – щетка не притерта

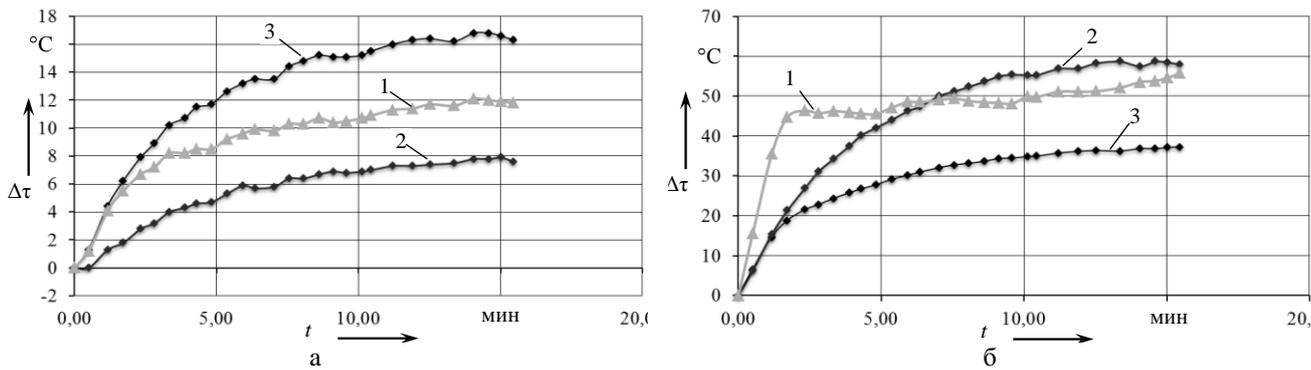


Рисунок 6 – Кривые превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) МПТ ПЗ1М с неисправностями: 1 – уменьшено удельное давление на щетку; 2 – исправный щеточный контакт; 3 – щетка не притерта

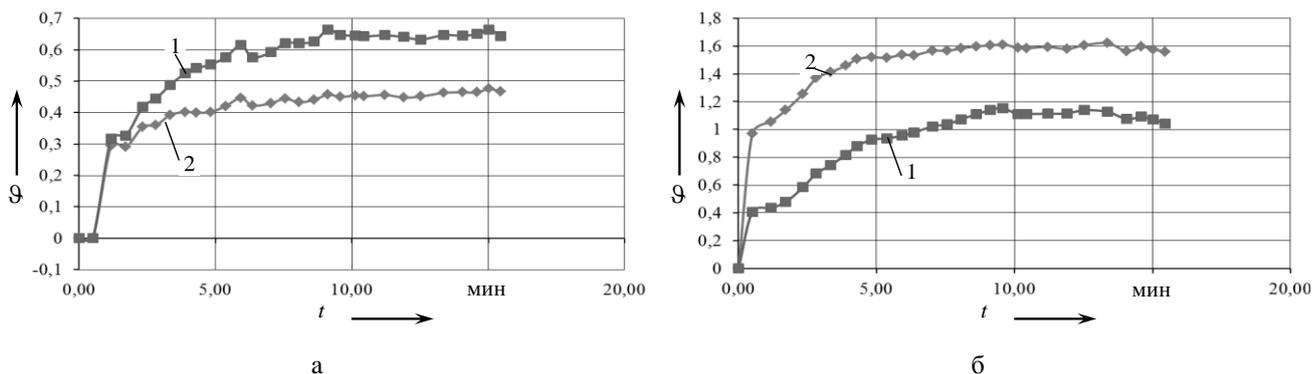


Рисунок 7 – График изменения отношения превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) МПТ ПЗ1М с неисправностями: 1 – отношение температур исправного контакта и контакта с уменьшенным давлением на щетку; 2 – отношение температур исправного контакта и контакта с непритертой щеткой

Выделены параметры для оценки технического состояния МПТ ПЗ1М: информацию о состоянии КЩУ целесообразно оценивать на интервале от начала процесса нагрева и до тех пор, пока тепло от других источников (например, обмотки якоря) не достигло коллекторно-щеточного контакта, а температура обладает диагностической ценностью. Для МПТ ПЗ1М этот период не превышает 5 мин, поскольку именно в этом временном интервале превышение температуры в КЩУ, а также отношения превышения температуры имеют наибольшие приращения.

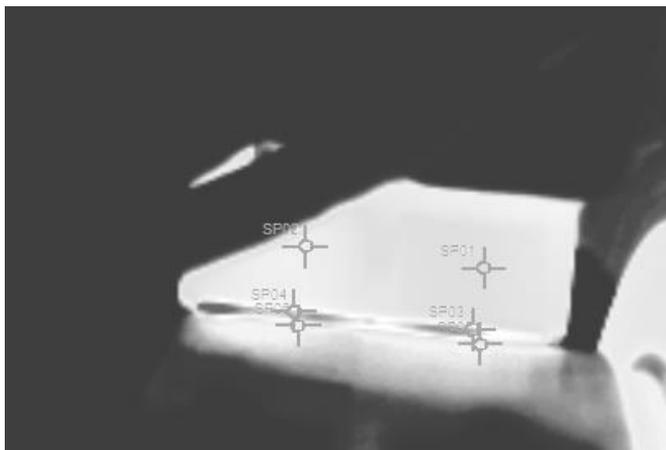


Рисунок 8 – Термограмма КЩУ ТЭД ТЛ-2К1

Отметим, что отношение превышения температуры в исправных щеточных контактах должно стремиться к единице, в то время как значительное его уменьшение свидетельствует

Для оценки технического состояния КЩУ температуру его деталей следует фиксировать и оценивать ее превышение во времени. Помимо анализа превышения температуры во времени следует оценивать изменение отношения превышения температуры в пространстве, а именно: отношение превышения температуры эталонного следа (исправного контакта «коллектор – щетка») к температуре следов других (неисправных) контактов. Анализируя изменение отношений температуры следов на коллекторе и температуры щеток во времени и их максимальные и минимальные значения, при накоплении необходимой статистической информации можно формировать заключение о состоянии контакта.

Отметим, что отношение превышения температуры в исправных щеточных контактах должно стремиться к единице, в то время как значительное его уменьшение свидетельствует

о значительном нагреве анализируемого следа на коллекторе. Обратную картину можно наблюдать при анализе изменений отношений температуры щеток.

Рассмотрим применение предложенных критериев оценки технического состояния к ТЭД ТЛ-2К1. Термографические исследования ТЭД ТЛ-2К1 (пример термограммы показан на рисунке 8) проводились на испытательной станции ремонтного локомотивного депо Западно-Сибирской железной дороги.

Анализ полученных графиков (рисунок 9) показал, что изменение превышения температуры коллектора и щеток во времени характеризуется экспоненциальной зависимостью. Изменение отношений превышения температуры коллектора и щеток близко к единице и незначительно изменяется во времени (рисунок 10), что свидетельствует об удовлетворительном состоянии КЩУ.

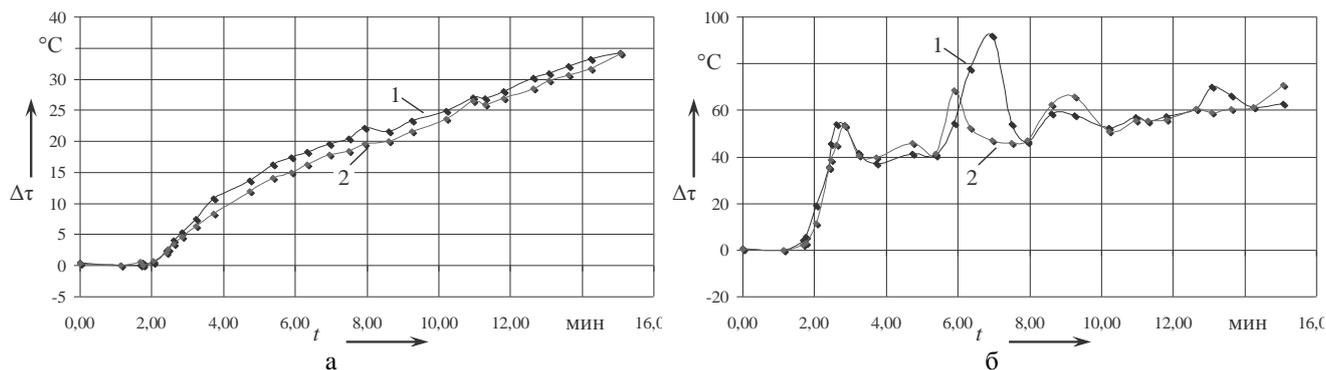


Рисунок 9 – Кривые превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) ТЭД ТЛ-2К1:  
1 – след первой щетки; 2 – след второй щетки

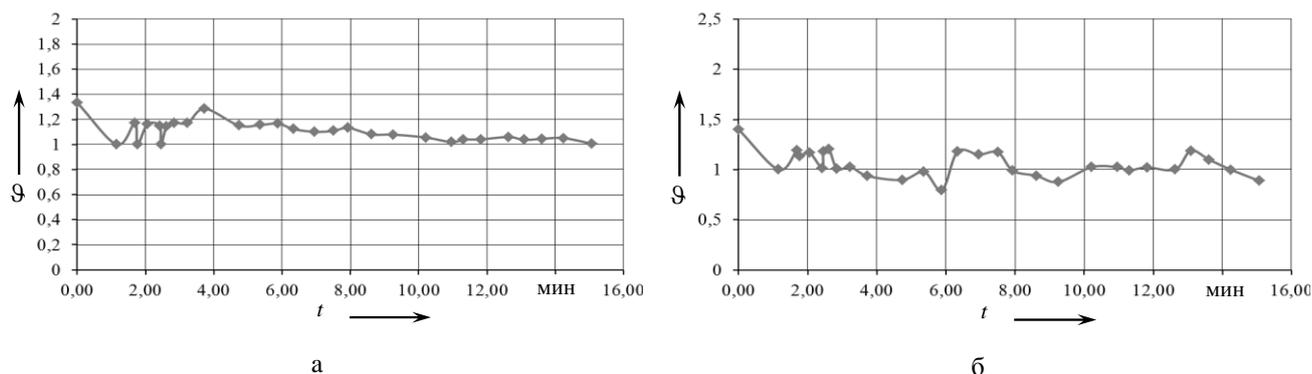


Рисунок 10 – График изменения отношений превышения температуры коллектора (а) и щеток (б) ТЭД ТЛ-2К1

Таким образом, оценку технического состояния КЩУ ТЭД с использованием технических средств по визуализации и измерению тепловых полей следует производить в период наибольшего приращения температуры, так как температура коллектора и щетки имеет на этом интервале значительную диагностическую ценность. Помимо оценки превышения температуры во времени необходимо анализировать зависимости отношений превышения температуры нагрева коллектора и щеток в эталонном и диагностируемых контактах.

### Список литературы

1. 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.
2. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 1 (13). – С. 42 – 48.

3. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 3 (7). – С. 52 – 57.

4. Харламов, В. В. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 4 (12). – С. 69 – 75.

5. Долгова, А. В. Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей магистральных электровозов [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Долгова Анна Владимировна. – Омск, 2013. – 20 с.

6. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса [Текст] / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия ТПУ / Томский политехн. ун-т. – Томск. – 2005. – № 7. – С. 156 – 159.

7. Харламов, В. В. Применение теории подобия при моделировании износа коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4 (8). – С. 57 – 62.

8. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины [Текст] / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. М.: Высшая школа, 1990. – 401 с.

## References

1. Kharlamov V. V. *Metodi i sredstva diagnostirovaniya tehničeskogo sostoyania kollektorno-shetochnoy uzla tyagovyh elektrodvigately i drugih kollektornyh 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: Omsk State Transport University, 2002, 233 p.

2. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Ahunov D. A., Khloptsov A. S. Improvement of diagnosing process of commutator profile of traction electric motors with PKP-4M device [Sovershenstvovanie processa diagnostirovaniya profilya kollektora tyagovyh elektrodvigately s pomoshyu pribora PKP-4M]. *Izvestiia Transsiba– The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 1 (13), pp. 42 – 48.

3. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Afonin A. P. Application device PKK-5M for commutation condition diagnostic of DC motors [Diagnostirovanie sostoyaniya kommutatsii kollektornyh elektrodvigately s ispolzovaniem pribora PKK-5M]. *Izvestiia Transsiba– The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 3 (7), pp. 52 – 57.

4. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Afonin A. P. The formation of an effective set of diagnostic parameters to control the technical condition of the collector-brush assembly traction motors are not identical in terms of operating cycles [Formirovanie effektivnogo mnozhestva diagnosticheskikh parametrov dlya kontrolya tehničeskogo sostoyaniya kollektorno-shetochnoy uzla tyagovyh elektrodvigately v usloviyah neidentichnosti kommutatsionnyh ciklov]. *Izvestiia Transsiba– The Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 4 (12), pp. 69 – 75.

5. Dolgova A. V. *Sovershenstvovanie tehnologii diagnostirovaniya kollektorno-shetochnoy uzla tyagovyh elektrodvigately magistralnyh elektrovozov* (Improvement the technology of diagnosing locomotives traction motors collector-brush assembly). Abstract Ph.D. thesis, Omsk, 2013, 20 p.

6. Shcherbatov V. V., Rapoport O. L., Tsukublin A. B. Modeling of the thermal state of the traction motor to predict the resource [Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa]. *Izvestia TPU – Proceedings of the TPU*, 2005, no. 7, pp. 156 – 159.

7. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Dolgova A. V. Application of similarity theory in modeling of wear traction motor commutator-brush assembly [Primenenie teorii podobiya pri modelirovanii iznosa kollektorno-shetochnoy uzla tyagovogo elektrodvigatelya]. *Izvestiia Transsiba– The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 4 (8), pp. 57 – 62.

8. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V. S. *Electricheskie mashini i mikromashini* (Electrical machinery and micromachines). Moscow: Higher School, 1990, 401 p.

УДК 621.335.11

А. А. Бакланов, Н. В. Есин, О. В. Гателюк

## ИЗМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ВЛ85 НА ВЫСШИХ ЗОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

*В статье предлагается изменение алгоритма работы плеч выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза ВЛ85 с целью индивидуального регулирования напряжения на тяговых двигателях при сохранении единой централизованной системы управления всеми преобразователями электровоза. Предложенные решения могут быть применены для ликвидации начавшегося боксования колесных пар локомотива без снижения силы тяги небоксующих колесных пар.*

На сети дорог ОАО «РЖД» широко эксплуатируются электровозы переменного тока ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, 2ЭС5К, ЭП1, на которых применено плавное регулирование напряжения тяговых двигателей с помощью управляемых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) [1].

Каждый ВИП этих электровозов состоит из восьми плеч силовых тиристорov, подключенных к вторичным обмоткам тягового трансформатора (рисунок 1).

На электровозах применено плавное зонно-фазовое регулирование напряжения, подводимого к тяговым двигателям. Управление всеми ВИПами электровоза осуществляет блок управления выпрямительно-инверторными преобразователями (БУВИП): он выдает в системы формирования импульсов (СФИ) ВИПа управляющие импульсы  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{03}$ ,  $\alpha_p$  в соответствии с данными таблицы. При этом условно можно считать высшими зоны со второй по четвертую.

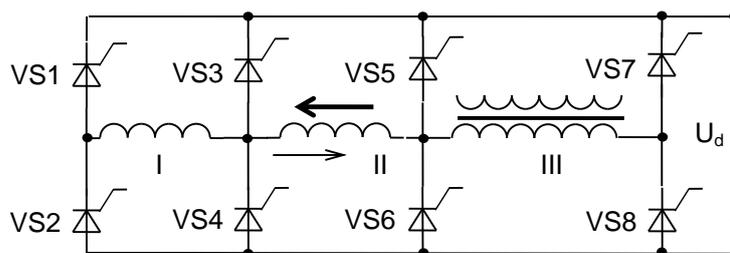


Рисунок 1 – Схема выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза ВЛ85

Алгоритм работы системы БУВИП

Зона	Номер полу-периода	Номера плеч ВИПов и выходных усилителей							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	1				$\alpha_p$	$\alpha_0, \alpha_p$			
	2			$\alpha_0$			$\alpha_p$		
II	1		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$			
	2	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$		
III	1				$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
	2			$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
IV	1		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$	
	2	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$					$\alpha_0$

В итоге на выходе ВИПа формируется выходное напряжение, представленное на рисунке 2 (первая и вторая зоны).

При этом среднее значение выпрямленного напряжения характеризуется формулами:  
для первой зоны –

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_p}^{\pi+\alpha_0} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha_0 + \cos \alpha_p), \quad (1)$$

для второй зоны –

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{03}}^{\alpha_p} U_m \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha_0}^{\pi+\alpha_p} 2U_m \sin \omega t d\omega t = \\ &= \frac{U_m}{\pi} (2 \cos \alpha_0 + \cos \alpha_p + \cos \alpha_{03}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения малой обмотки трансформатора, В.

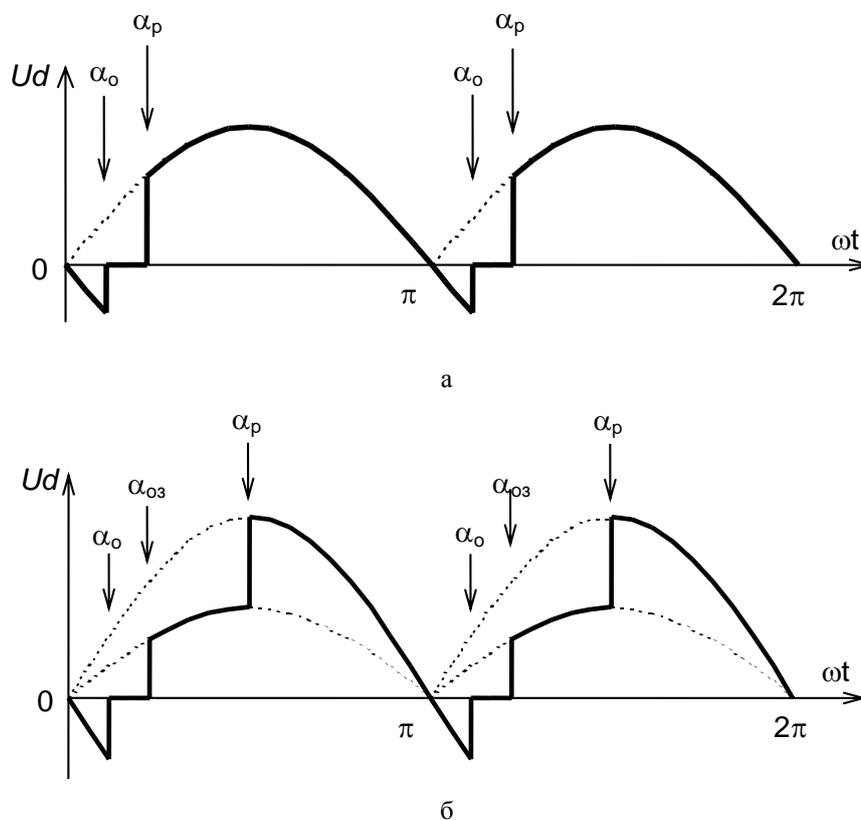


Рисунок 2 – Диаграммы выпрямленного напряжения на выходе ВИПа на первой (а) и на второй (б) зонах регулирования

Анализ показывает, что имеется возможность изменения алгоритма работы плеч выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза силовыми тиристорами ВИПа с целью регулирования напряжения на тяговых двигателях индивидуально по каждому ВИПу без изменения фазы угла открытия силовых тиристорov, заданной общей системой управления БУВИП. Этого можно достичь путем незначительного изменения алгоритма управления выходными каскадами усилителей системы управления преобразователем, принадлежность которых определена для каждого двигателя. При сохранении групповых систем питания и зонно-фазового принципа управления тяговым электроприводом всего электровоза удастся индивидуализировать выдачу сигнала открытия плеча выпрямителя соответствующей пары двигателей, а при незначительном усовершенствовании – и для каждого из двигателей. В последнем случае снижение усилия тяги всего локомотива соответствует 1/8 или 1/12 части общего усилия.

Изменение алгоритма управления заключается в прицельном формировании сигнала запрета на выдачу управляющего импульса для открытия соответствующих тиристоров, т. е. в искусственном пропуске полуволны выпрямленного напряжения. Напряжение в контактной сети имеет частоту 50 Гц, следовательно, в промежутке времени, равном одной секунде, при выпрямлении укладывается 100 полупериодов выпрямленного напряжения. Отсутствие одной полуволны напряжения в течение одной секунды снижает напряжение на 1%. Формированием соответствующего алгоритма для выходных устройств управления выпрямительно-инверторными преобразователями имеется возможность убирать любое число полупериодов выпрямленного напряжения, запрещая подачу импульсов на управляющие электроды тиристоров, работающих в тех полупериодах, которые необходимо убрать. Этот принцип поясняет диаграмма измененного (по сравнению с рисунком 2, б) выпрямленного напряжения второй зоны, показанная на рисунке 3.

Как видно из диаграммы на рисунке 3, каждый второй полупериод исчезает добавка напряжения, вносимая данной зоной.

Среднее значение выпрямленного напряжения на второй зоне регулирования при этом характеризуется формулой:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{03}}^{\alpha_p} U_m \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_p}^{\pi+\alpha_0} 2U_m \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{03}}^{\pi+\alpha_0} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} (\cos \alpha_p + 3 \cos \alpha_0 + 2 \cos \alpha_{03}). \quad (3)$$

В результате происходит снижение среднего значения выпрямленного напряжения по сравнению с таким же напряжением, но при отсутствии блокировки импульсов  $\alpha_p$ .

Таким образом, не отпирая соответствующие тиристоры в определенные полупериоды питающего напряжения, можно снизить подведенное напряжение, например, для склонного к боксованию колесно-моторного блока, уменьшая тем самым тенденцию к боксованию.

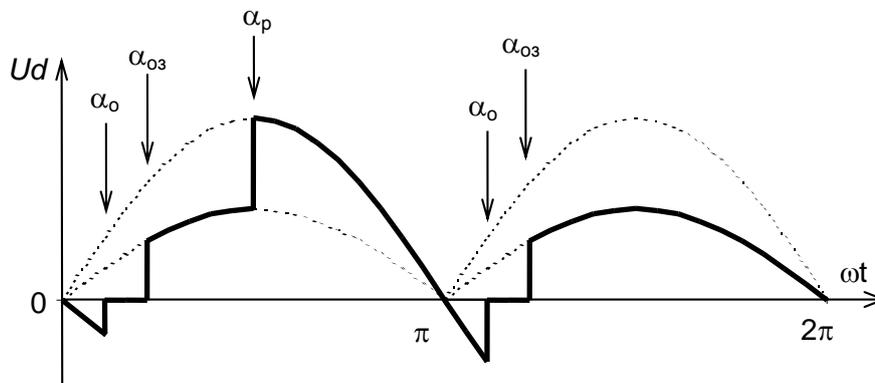


Рисунок 3 – Диаграмма выпрямленного напряжения на выходе ВИПа при блокировании импульса  $\alpha_p$  во втором полупериоде

Такой алгоритм управления дает возможность снижать питающее напряжение на любую величину, а рациональной последовательностью пропускаемых полупериодов добиться малозаметного влияния на работу тягового двигателя и электровоза в целом. К этому следует добавить, что наличие зон в выпрямительно-инверторных преобразователях дает возможность снижения эффекта искусственного пропуска, так как на зонах выше первой может сниматься только добавка напряжения или даже часть этой добавки.

Кроме того, в зависимости от величины угла регулирования  $\alpha_p$  степень снижения среднего значения выпрямленного напряжения будет разной и, следовательно, разным будет противобоксовочное воздействие, оказываемое на тяговый двигатель боксующего колесно-моторного блока, как это видно из рисунка 4.

При максимальной величине угла  $\alpha_p$  степень снижения напряжения будет минимальной и прекращения боксования может не произойти, а при  $\alpha_p$ , близком к  $\alpha_{p \min}$ , уровень снижения напряжения будет максимальным. Поэтому периодичность пропуска полупериодов выпрямленного напряжения может быть установлена разной в зависимости от фазы угла регулирования  $\alpha_p$ : при  $\alpha_p$ , равном или близком к  $\alpha_{p \max}$ , частота пропуска полуволн будет максимальной, а при  $\alpha_p$ , равном или близком к  $\alpha_{p \min}$ , частота будет минимальной. Для этого полупериод выпрямленного напряжения может быть разделен условно на несколько частей, например, на четыре. При этом каждая часть полупериода имеет длительность  $\pi/4$  (45 эл. град). При нахождении фазы  $\alpha_p$  в диапазоне от  $\pi$  до  $(3/4)\pi$  будет осуществляться пропуск, например, каждого второго полупериода, в диапазоне от  $(3/4)\pi$  до  $\pi/2$  – каждого четвертого, в диапазоне от  $\pi/2$  до  $\pi/4$  – каждого шестого и в диапазоне от  $\pi/4$  до  $\alpha_{o3}$  – каждого восьмого полупериода.

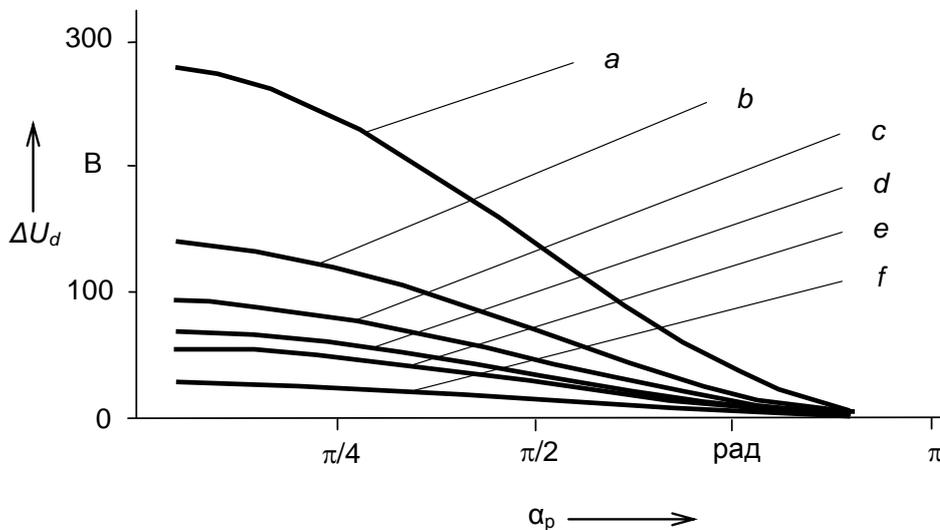


Рисунок 4 – График уменьшения напряжения на выходе ВИПа на второй зоне регулирования в зависимости от фазы регулирования  $\alpha_p$  и периодичности пропуска полупериодов выпрямленного напряжения:  
 а – пропуск всех полупериодов, б – 2-й, с – 3-й, d – 4-й, e – 5-й, f – 10-й

Приведенный в данной статье измененный алгоритм работы плеч ВИПа может быть достаточно перспективным для электровозов ВЛ85 и других, так как

появляется возможность для управления процессами тяги прицельно для группы двигателей (а принципиально – для каждого из двигателей при незначительной модернизации силовых схем) при сохранении групповых систем управления как по силовым цепям, так и по каналам зонно-фазового регулирования. Эта возможность может быть практически реализована в виде быстродействующей системы защиты от боксования;

обладая высоким быстродействием, подобная система защиты от боксования позволит осуществить опережающее воздействие на развитие ненормальных режимов, особенно если заменить сигнал традиционного реле боксования сигналом столь же быстродействующим, соответствующим сути самой системы;

предложенная система никоим образом не влияет на компоновку силовых цепей электровоза, являясь, по существу, добавкой к имеющемуся блоку управления выпрямительно-инверторным преобразователем, она легко вписывается в алгоритм управления электроподвижной единицей и в случае использования микропроцессорной системы управления.

1. Тушканов, Б. А. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации [Текст] / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.

1. Tushkanov B. A., Pushkarev N. G., Pozdnjakova L. A. *Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Electric locomotive VL85: User Manual). Moscow: Transport Publ., 1992, 480 p.

УДК 621.311.1

А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Совершенствование методов электрических расчетов в общем случае направлено на повышение точности получаемых результатов. Одним из направлений совершенствования методов расчета является учет в расчетах различных факторов, оказывающих влияние на точность расчета параметров системы тягового электроснабжения. В настоящей статье рассмотрен подход, направленный на совершенствование метода электрического расчета в части повышения точности путем изменения алгоритма расчета и учета ряда дополнительных факторов.*

Проектирование новых электрифицируемых участков, а также реконструкция и модернизация существующих неразрывно связаны с проведением электрических расчетов, в ходе которых определяются различные энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения. В настоящее время известно много методов расчета энергетических показателей системы тягового энергоснабжения: по заданному расположению поездов; по сечениям графика движения поездов; по заданным размерам движения поездов [1] и др. С развитием вычислительной техники наибольшее распространение получил метод расчета по сечениям графика движения поездов. Меньший шаг при получении сечений графика движения обеспечивает большую точность вычислений.

Решение задачи определения основных параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог переменного тока, оценки энергетических показателей и электромагнитной совместимости основано на проектных расчетах с помощью соответствующих методик и программ, примерами которых могут являться методики расчета параметров тяговых сетей переменного тока [2, 3]. Сохраняет свою актуальность вопрос повышения точности расчетов, решение которого позволяет получить результаты, адекватные данным измерений, например, по определению потерь электроэнергии в тяговой сети [4].

Перечисленные выше методы расчета энергетических параметров СТЭ основаны на определении электрических нагрузок по графику движения поездов. При этом в основе определения тяговой нагрузки лежит тяговый расчет, выполняемый для постоянного уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Следует отметить, что проведение расчетов на основе указанного метода вносит неточности, связанные с тем, что напряжение в контактной сети непрерывно изменяется и может достигать предельных значений, что, однако, в данных методах не учитывается. Указанное обстоятельство приводит к тому, что картина токораспределения, расхода энергии и потерь в тяговой сети носит искаженный характер.

В настоящей статье представлен усовершенствованный порядок расчета следующих показателей СТЭ: токов нагрузки электроподвижного состава, минимального напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС), коэффициента реактивной мощности для проектируемых участков железных дорог и участков, находящихся в эксплуатации, а также расхода электрической энергии.

Тяговые расчеты выполняются в соответствии с рекомендациями источника [5] для спрямленного и приведенного профиля пути.

Расчет величины уклона спрямленного элемента профиля выполняют по выражению:

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^J i_j \cdot S_j}{\sum_{j=1}^J S_j}, \quad (1)$$

где  $i_j$  – уклон  $j$ -го элемента профиля;

$S_j$  – длина  $j$ -го элемента профиля.

Расчет величины уклона спрямленного элемента профиля для кривых участков пути выполняют по формуле:

$$i''_c = \frac{1}{l_c} \sum_{j=1}^z w_{rj} l_{rj}, \quad (2)$$

где  $l_c$  – длина элемента профиля, содержащего кривые участки;

$w_{rj}$  – удельное дополнительное сопротивление движению от  $j$ -й кривой;

$l_{rj}$  – длина  $j$ -й кривой;

$z$  – количество кривых на участке.

Удельное дополнительное сопротивление движению поезду от кривой рассчитывают по формуле:

$$w_r = \frac{700}{R}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус кривой.

Расчет крутизны уклона приведенного элемента осуществляют по выражению:

$$i_c = i'_c + i''_c. \quad (4)$$

Тяговые расчеты выполняют методом интегрирования уравнения движения поезда с максимальной величиной шага интегрирования  $\Delta t = 1$  с для каждого поезда в четном и нечетном направлениях по расчетным размерам движения поездов с учетом серии электроподвижного состава, массы состава и нагрузки на ось состава.

На первом шаге интегрирования расчета напряжение на токоприемнике  $U_{k=1}$  принимают равным номинальному в контактной сети (25 кВ), начальную скорость движения поезда  $V_{k=1}$  принимают равной  $V_0$  (0 км/ч) и начальную координату поезда на плане пути  $S_{k=1}$  равной 0 км. При этом на каждом  $k$ -м шаге интегрирования определяют величину основного удельного сопротивления движению поезда для скорости  $V_k$ :

для электровозов и электропоездов –

$$w'_{0k} = A + B \cdot V_k + C \cdot V_k^2, \quad (5)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коэффициенты, определяемые согласно указаниям работы [5] для звеньев или бесстыкового пути, определенных серии электропоезда и режима ведения поезда (под током или на холостом ходу) –

для вагонов:

$$w''_{0k} = D + \frac{E + F \cdot V_k + G \cdot V_k^2}{q_0}, \quad (6)$$

где  $D$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $G$  – коэффициенты, определяемые согласно [5] для грузовых или пассажирских вагонов, звеньев или бесстыкового пути, количества осей вагона и типа подшипников;

$q_0$  – нагрузка на ось состава.

Результующее основное удельное сопротивление движению поезда определяют по выражению:

$$w_{0k} = \frac{w'_{0k} \cdot m_{л} + w''_{0k} \cdot m_c}{m_{л} + m_c}, \quad (7)$$

где  $m_{л}$  и  $m_c$  – масса локомотива и состава.

На каждом  $k$ -м шаге интегрирования по правилам тормозных расчетов определяют величину тормозного пути до остановочного пункта при заданной скорости  $V_k$ :

$$S_{Tk} = 0,278 \cdot V_k \cdot t_{\text{п}} + \frac{500(V_k^2 - V_{\text{ост}}^2)}{\zeta \cdot 1000(1000g_p \cdot \varphi_{\text{кр}} + w_{0k} \cdot i_c)}, \quad (8)$$

где  $t_{\text{п}}$  – время подготовки тормозов к действию, которое определяется в зависимости от типа состава, типа тормозов и количества осей состава;

$V_{\text{ост}}$  – скорость проследования остановочного пункта;

$\zeta$  – величина, обратная приведенной массе одной тонны веса поезда. Согласно рекомендациям [5] при всех эксплуатационных расчетах значение  $\zeta$  следует принимать равным 120;

$g_p$  – расчетный тормозной коэффициент поезда, определяется согласно указаниям работы [5];

$\varphi_{\text{кр}}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок, определяется тоже согласно [5].

Если выполняется неравенство

$$S_k + S_{Tk} > S_{\text{ОП}} + \frac{l_{\text{по}}}{2}, \quad (9)$$

где  $S_{\text{ОП}}$  – координата остановочного пункта;

$l_{\text{по}}$  – длина приемоотправочных путей остановочного пункта,

то режим торможения применяют с предыдущего шага интегрирования  $k - 1$  до остановки поезда в остановочном пункте, а именно: на каждом шаге интегрирования определяют величины тормозной силы  $B_{kk-1}$  (кН), удельного замедляющего усилия  $b_{kk-1}$  (Н/кН) согласно выражению (20), значение снижения скорости  $\Delta V_{k-1}$  согласно (21).

Если выполняется неравенство

$$S_{\text{ОП}} \leq S_k + S_{Tk} \leq S_{\text{ОП}} + \frac{l_{\text{по}}}{2}, \quad (10)$$

то режим торможения применяют с текущего шага интегрирования  $k$  до остановки поезда в остановочном пункте, а именно: на каждом шаге интегрирования определяют величины тормозной силы  $B_{kk}$  (кН), удельного замедляющего усилия  $b_{kk}$  (Н/кН) согласно уравнению (21), значение падения скорости  $\Delta V_k$  согласно (22).

Если выполняется неравенство

$$S_k + S_{Tk} < S_{\text{ОП}}, \quad (11)$$

то дальнейший расчет выполняют в последовательности действий описанных ниже.

По тяговым характеристикам  $F_k(V)$  определяют значение силы тяги  $F_{kk}$  (кН) на  $k$ -м шаге интегрирования для скорости  $V_k$ . Расчет величины удельной силы тяги на  $k$ -м шаге интегрирования осуществляют по выражению:

$$f_{kk} = \frac{F_{kk} \cdot 10^3}{(m_c + m_{\text{п}})g}, \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Расчет величины удельного ускоряющего усилия на  $k$ -м шаге интегрирования производят по уравнению:

$$f_{yk} = f_{kk} - w_0 - i_c. \quad (13)$$

Значение приращений скорости  $\Delta V_k$  (км/ч) и пройденного пути  $\Delta S_k$  (км) определяют по выражениям соответственно:

$$\Delta V_k = \frac{\zeta \cdot f_{yk} \cdot \Delta t}{3600}; \quad (14)$$

$$\Delta S_k = \frac{2V_k + \Delta V_k}{2 \cdot 3600} \cdot \Delta t. \quad (15)$$

Расчет конечного времени  $k$ -го шага интегрирования  $t_{k+1}$  (с), скорости  $V_{k+1}$  (км/ч) и конечной координаты на  $k$ -м шаге интегрирования  $S_{k+1}$  (км) осуществляют по уравнениям:

$$t_{k+1} = \Delta t \cdot k; \quad (16)$$

$$V_{k+1} = V_k + \Delta V_k; \quad (17)$$

для четных поездов –

$$S_{k+1} = S_k + \Delta S_k; \quad (18)$$

для нечетных –

$$S_{k+1} = S_k - \Delta S_k. \quad (19)$$

Если

$$V_{k+1} \geq V_{k+1}^{\text{орп}}, \quad (20)$$

где  $V_{k+1}^{\text{орп}}$  – максимально допустимая скорость для расчетной категории поездов на участке пути с координатой  $S_{k+1}$ , принимают  $V_{k+1} = V_{k+1}^{\text{орп}}$  и на шаге  $k+1$  для  $w_0 + i_c \geq 0$  режимом ведения поезда выбирают выбег и принимают  $f_{\kappa k+1} = 0$ , а для  $w_0 + i_c < 0$  в качестве режима выбирают торможение и для скорости  $V_{k+1}$  по тормозным характеристикам  $B_{\kappa}(V)$  определяют величину тормозной силы  $B_{\kappa k+1}$  (кН), для которой находят величину удельного замедляющего усилия:

$$b_{y^{k+1}} = \frac{B_{\kappa k+1} \cdot 10^3}{(m_c + m_n) g} + w_0 + i_c, \quad (21)$$

значение падения скорости

$$\Delta V_{k+1} = \frac{\zeta \cdot b_{y^{k+1}} \cdot \Delta t}{3600}. \quad (22)$$

Расчет средней скорости движения  $V_{k \text{ ср}}$  на  $k$ -м шаге интегрирования осуществляют по формуле:

$$V_{k \text{ ср}} = \frac{V_k + V_{k+1}}{2}. \quad (23)$$

Для режима тяги по токовым характеристикам  $I_d(V)$  и  $I_{da}(V)$  для  $V_{k \text{ ср}}$  определяют значения полного тягового тока  $I_{dk}$  и активного тягового тока  $I_{dak}$  поезда. Для режима торможения по характеристикам рекуперативного торможения  $I_p(V)$  и  $I_{pa}(V)$  для  $V_{k \text{ ср}}$  определяют значения полного тока рекуперации  $I_{pk}$  и активного тока рекуперации  $I_{pak}$  поезда. Для режима выбега принимают  $I_{dk} = 0$  и  $I_{dak} = 0$ . Перечисленные токовые характеристики и характеристики рекуперативного торможения для первого шага интегрирования принимаются по паспортным (номинальным) данным для номинального напряжения  $U = 25$  кВ. Для дальнейших шагов расчета напряжение предлагается определять по результатам электрического расчета на предыдущем шаге, после чего осуществлять пересчет характеристик для скоростей  $V'$  (см. выражение (44)), значения указанных выше токов при этом определяют по пересчитанным характеристикам. Учет уровня напряжения в данном случае позволяет повысить точность расчетов.

Определяют полный и активный ток собственных нужд электроподвижного состава:

$$I_{c.нk} = \frac{P_{c.н}}{U_k}; \quad (24)$$

$$I_{c.наk} = \frac{P_{c.на}}{U_k}, \quad (25)$$

где  $P_{c.н}$ ,  $P_{c.на}$  – соответственно полная (кВ·А) и активная (кВт) мощность собственных нужд электроподвижного состава.

Полный и активный ток электроподвижного состава определяют по формулам: для режима тяги –

$$I_k = I_{dk} + I_{c.нk}; \quad (26)$$

$$I_{ak} = I_{dak} + I_{c.наk}; \quad (27)$$

для режима рекуперативного торможения –

$$I_k = I_{pk} - I_{c.нk}; \quad (28)$$

$$I_{ak} = I_{pak} - I_{c.наk}. \quad (29)$$

Значение тока поезда в комплексном виде представляется следующим образом:

$$\underline{J}_k = I_k e^{-j \arccos \left( \frac{I_{ak}}{I_k} \right)}. \quad (30)$$

Результаты тяговых расчетов представляют в виде таблицы значений координат поезда  $S_k$ , полного  $I_k$  и активного  $I_{ak}$  тока и тока в комплексном виде  $\underline{J}_k$  с равномерным шагом по времени  $\Delta t$  (таблица).

Результаты тягового расчета для одного поезда на расчетном участке

Время, с	Координата поезда, км	Полный ток, А	Активный ток, А	Значение тока в комплексном виде, А
$t_k$	$S_k$	$I_k$	$I_{ak}$	$\underline{J}_k$
$t_{k+1}$	$S_{k+1}$	$I_{k+1}$	$I_{ak+1}$	$\underline{J}_{k+1}$
...	...	...	...	...
$t_K$	$S_K$	$I_K$	$I_{aK}$	$\underline{J}_K$

Построение расчетного суточного графика движения поездов, представляющего собой зависимость  $S_k(t_k)$ , осуществляют для выполнения электрических расчетов по методу мгновенных схем. Расчетный суточный график движения поездов строят в двухмерной системе координат, по оси абсцисс откладывается время (t, мин) от 0 до 1440 мин, по оси ординат – расстояние (S, км) от начальной станции расчетного участка, соответствующей начальной станции для четного направления движения поездов на участке, до конечной станции. На оси ординат наносятся координаты всех остановочных пунктов и тяговых подстанций расчетного участка. Первую нитку расчетного графика движения поездов, соответствующую первому поезду, принимаемому к тяговому расчету, следует откладывать из точки начала системы координат.

Построение каждой нитки расчетного графика движения поездов осуществляют пошагово, при этом каждому шагу  $k+1$  соответствует точка на графике движения с координатами  $(t_{k+1}; S_{k+1})$  в соответствии с таблицей результатов тяговых расчетов (см. таблицу).

Для расчетного графика движения поездов каждая следующая нитка опережает предыдущую по оси абсцисс на величину межпоездного интервала для данных размеров движения, которая должна удовлетворять условию:

$$t_{\text{чет/неч}}^{\text{меж}} = \frac{1440}{N_{\text{чет/неч}}} \geq t_{\text{мин}}^{\text{меж}}, \quad (31)$$

где  $N_{\text{чет/неч}}$  – количество поездов в сутки в соответствующем направлении;

$t_{\text{мин}}^{\text{меж}}$  – минимально допустимый межпоездной интервал на расчетном участке.

При построении графика движения для расчета показателей на эксплуатируемых участках необходимо учитывать местные условия пропуска поездов – межпоездные интервалы, количество поездов в пакетах и чередование пропуска поездов повышенного веса и (или) длины.

На участках обращения поездов повышенного веса и (или) длины при построении графика движения для электрических расчетов принимают:

для участков с количеством главных путей два и более – пропуск пакета из четырех поездов повышенного веса и (или) длины с межпоездным интервалом 10 мин в направлении наибольшего токопотребления и потока поездов графического веса с интервалом 12 мин во встречном направлении;

на однопутных участках – частично-пакетный график при безостановочном пропуске трех поездов повышенного веса и (или) длины с межпоездным интервалом 10 мин в направлении наибольшего токопотребления и скрещении этого пакета поездов со встречными поездами установленного графика движения веса.

Шаг интегрирования  $k'$ , соответствующий началу построения очередной нитки в расчетном графике, определяют по выражению:

$$k' = \frac{t_{\text{чет/неч}}^{\text{меж}} \cdot 60}{\Delta t}. \quad (32)$$

В случае необходимости значение шага интегрирования округляется до целого значения в большую сторону.

Электрический расчет выполняют на основе созданного расчетного суточного графика движения поездов методом мгновенных схем с расчетным шагом, равным шагу интегрирования тяговых расчетов  $\Delta t$ . Дополнительной информацией для электрических расчетов на каждом  $k$ -м шаге являются следующие данные:

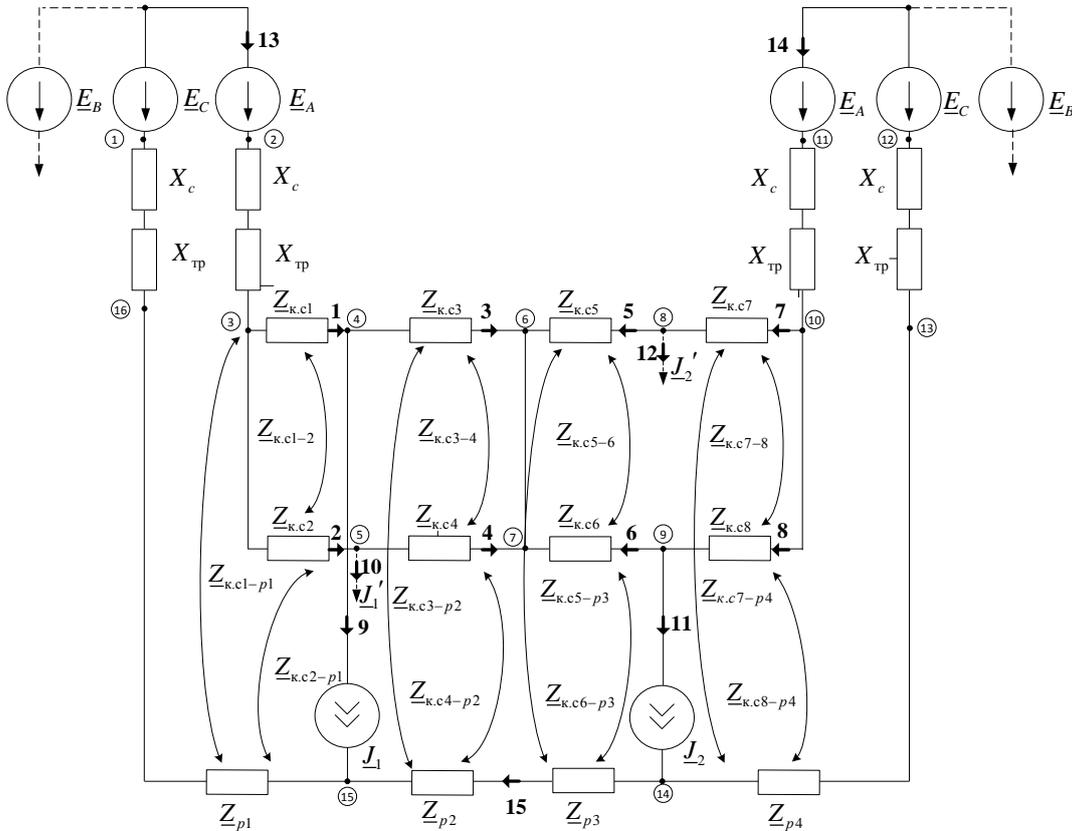
координаты поездов  $S_k^i$  (где  $i$  – порядковый номер поезда на участке) для  $k$ -го шага расчета в момент времени  $t_k$  согласно построенному расчетному суточному графику движения поездов;

значения тока электроподвижного состава в комплексном виде  $J_k$  для данных поездов, полученные по результатам тягового расчета для  $k$ -го шага интегрирования (см. таблицу).

Расчет минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава на расчетном участке выполняют для каждого момента времени  $t$  с помощью матричного метода анализа сложных цепей с использованием метода контурных токов [6 – 12].

Расчет значений токов в элементах системы тягового электроснабжения проводят на основе схемы замещения, параметры которой определяются СТЭ (напряжением 25 кВ или 2×25 кВ), а также схемой секционирования контактной сети расчетного участка. Пример схемы замещения для двухпутного участка с двумя тяговыми подстанциями и узловой схемой питания представлен на рисунке.

После составления схемы замещения определяют количество ветвей  $v$  и узлов  $q$  в схеме и задают независимые контуры, количество которых  $k$  определяется топологией схемы секционирования контактной сети и количеством поездов.



Пример схемы замещения для двухпутного участка системы тягового электроснабжения 25 кВ с двумя тяговыми подстанциями и узловой схемой питания

При расчете принимают следующие допущения:

в схеме замещения тяговую нагрузку представляют в комплексном виде источниками тока  $J_v$ , значение которых принимается в соответствии с уравнением (30);

напряжение на шинах тяговой подстанции представляют в виде ЭДС соответствующих фаз, сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$ ;

взаимное электромагнитное влияние проводов контактной подвески и рельсовой цепи учитывают путем введения в схему замещения взаимных индуктивностей.

Расчет контурных токов в комплексном виде проводят для каждого шага моделирования по выражению:

$$[I_{kk}] = \{ [K_z] [Z_v] [K_z]^T \}^{-1} \cdot [K_z] \{ [E_v] - [Z_v] [J_v] \}, \quad (33)$$

где  $[I_{kk}]$  – матрица контурных токов, представляющая собой вектор размером  $k \times 1$ :

$$[I_{kk}] = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ \dots \\ I_{kk} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

где  $[K_r]$  – матрица независимых контуров размером  $k \times v$ , составленная из чисел 0, 1, -1, строки которой соответствуют номеру главного контура, а столбцы – номеру ветви. Если

направление обхода контура совпадает с направлением тока в ветви, то в соответствующую ячейку  $[K_r]$  ставят 1, если не совпадает, то  $-1$ , если ветвь не обходится, то 0;

$[K_r]^T$  – транспонированная матрица независимых контуров размером  $v \times k$ ;

$[E_v]$  – матрица ЭДС ветвей, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ . Если в одной ветви содержится несколько ЭДС, то результирующее значение определяется как сумма комплексных значений этих ЭДС:

$$[E_v] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_v \end{bmatrix}; \quad (35)$$

$[J_v]$  – матрица источников тока, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ , составленный из значений токов тяговой нагрузки  $J_v$  для соответствующей ветви:

$$[J_v] = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_v \end{bmatrix}; \quad (36)$$

$[Z_v]$  – квадратная матрица комплексных сопротивлений ветвей, размер которой определяется количеством ветвей схемы замещения и равен  $v \times v$ . При этом главная диагональ матрицы содержит собственные сопротивления ветвей  $Z_{11}, Z_{22} \dots Z_{vv}$ , а остальные ячейки – сопротивления взаимной индукции соответствующих ветвей  $Z_{12}, Z_{13}$  и т. д.:

$$[Z_v] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1v} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{v1} & Z_{v2} & \dots & Z_{vv} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

В качестве элементов, входящих в собственные сопротивления ветвей, принимают входные индуктивные сопротивления системы внешнего электроснабжения, приведенные к сборным шинам распределительного устройства напряжением 27,5 кВ:

$$X_c = \frac{jU_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{к.з}}}, \quad (38)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение тяговой обмотки понижающего трансформатора;

$S_{\text{к.з}}$  – мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на шинах высшего напряжения тяговой подстанции в максимальном режиме;

сопротивление понижающего трансформатора (автотрансформатора для системы 2×25 кВ), Ом:

$$X_{\text{тр}} = \frac{j u_{\text{к}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{тр}}}, \quad (39)$$

где  $u_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора;

$n$  – количество включенных на сборные шины распределительного устройства напряжением 27,5 кВ понижающих трансформаторов;

$S_{тр}$  – номинальная мощность понижающего трансформатора тяговой подстанции А, (В);  
сопротивление участков контактной подвески и рельсовой цепи:

$$\underline{Z}_{т.с} = z_{уд} (S_{кон} - S_{нач}) + z_{пит. и отс}, \quad (40)$$

где  $z_{уд}$  – удельное сопротивление элементов тяговой сети;

$S_{нач}$ ,  $S_{кон}$  – начальная и конечная координаты участка тяговой сети;

$z_{пит. и отс}$  – сопротивление питающих и отсасывающих линий, включаемое в сопротивление участков контактной подвески и рельсовой цепи в соответствии со схемой питания и секционирования;

сопротивление действующих устройств компенсации реактивной мощности, которое представляется в схеме замещения в виде емкостного сопротивления с углом сдвига фаз  $-90^\circ$ , включенного последовательно в отсасывающую линию тяговой подстанции для устройств продольной компенсации и параллельно тяговой сети для устройств поперечной компенсации.

Сопротивление взаимоиנדукции ветвей определяется аналогично собственному сопротивлению участков контактной подвески и рельсовой цепи в соответствии с выражением (40).

На основе рассчитанной матрицы контурных токов определяют матрицу токов ветвей размером  $v \times 1$ :

$$[I_v] = [K_r]^T [I_{kk}]. \quad (41)$$

Определяют потенциалы всех узлов схемы замещения  $\varphi_q$ , В, в соответствии со вторым законом Кирхгофа или иным способом, учитывая, что известны значения тока и сопротивления ветвей. Затем определяют значение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава  $n$ -го поезда как разность потенциалов узлов схемы, к которым приложена тяговая нагрузка, и записывают его в комплексном виде:

$$\underline{U} = \varphi_{к.п} - \varphi_p = U e^{j\alpha'}, \quad (42)$$

где  $\varphi_{к.п}$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и контактный провод;

$\varphi_p$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и рельс;

$\alpha'$  – угол сдвига фаз между напряжением и током на токоприемнике электроподвижного состава.

Проверяют выполнение неравенства:

$$|\alpha' - \alpha| < 1^\circ. \quad (43)$$

где  $\alpha$  – угол сдвига фаз между напряжением и током на токоприемнике электроподвижного состава на предыдущем шаге расчета (на первом шаге его принимают равным нулю).

При выполнении неравенства (43) для каждого поезда на участке расчет мгновенной схемы заканчивается, в противном случае выполняют перерасчет матрицы источников тока (формула (36)) путем умножения заданных токов  $\underline{J}_v$  на  $e^{j(\alpha' - \alpha)}$  и повторяют расчет в соответствии с уравнениями (33), (41), (42).

Расчет повторяют до тех пор, пока неравенство (43) не будет выполнено.

Полученное значение расчетного напряжения  $|\underline{U}|$  применяют на шаге интегрирования  $k+1$  применительно к рассматриваемому поезду, т. е. принимают  $U_{k+1} = |\underline{U}|$  и осуществляют пересчет токовых характеристик для скорости  $V'$  по выражению:

$$V' = V \frac{U_{k+1}}{U_{\text{ном}}}, \quad (44)$$

где  $V$  – скорость по тяговой характеристике при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$ .

Для определения токов  $I_{k+1}$  и  $I_{ak+1}$  на  $k+1$  шаге интегрирования используют пересчитанные токовые характеристики. При этом значения напряжения используют для пересчета токовых характеристик ЭПС при проведении тяговых расчетов по выражениям (24) – (30), после чего полученные значения токов используют в электрическом расчете.

После завершения расчетов на участке формируют множество значений напряжения на токоприемнике электроподвижного состава  $U_{\text{МПЗ}}$  и определяют множество усредненных трехминутных значений  $U_{\text{МПЗ}(3\text{min})}$ , из которого для каждой межподстанционной зоны определяют величину минимального напряжения  $U_{\text{МПЗ}(3\text{min})}^{\text{min}}$ :

$$U_{\text{МПЗ}(3\text{min})}^{\text{min}} = \min \{ u_{\text{МПЗ}(3\text{min})} \in U_{\text{МПЗ}(3\text{min})} \}. \quad (45)$$

Определяют полную мощность, потребляемую по каждой фазе тяговой подстанции, на  $k$ -м шаге расчета для мгновенной схемы замещения:

$$\underline{S}_k = \sum \dot{E} I^*, \quad (46)$$

где  $I^*$  – сопряженное значение тока, текущего в ветви, содержащей ЭДС  $\dot{E}$ .

На следующем шаге рассчитывают объем потребленной электроэнергии для каждой межподстанционной зоны рассматриваемого участка по фазам тяговой подстанции за сутки: активной –

$$W_a = \text{Re} \left[ \frac{24 \left( \sum_{k=1}^K S_k \right)}{3600 \cdot 1000} \right], \quad (47)$$

реактивной –

$$W_r = \text{Im} \left[ \frac{24 \left( \sum_{k=1}^K S_k \right)}{3600 \cdot 1000} \right], \quad (48)$$

где  $K$  – количество шагов интегрирования в тяговом расчете;

$\text{Re}[\ ]$ ,  $\text{Im}[\ ]$  – соответственно действительная и мнимая составляющие расхода электроэнергии, представленного в комплексной форме.

Определяют среднесуточный коэффициент реактивной мощности для каждой фазы тяговой подстанции:

$$\text{tg } \varphi = \frac{W_r}{W_a}. \quad (49)$$

Предложен усовершенствованный метод электрических расчетов СТЭ переменного тока, позволяющий учитывать изменяющийся уровень напряжения при проведении тяговых расчетов и корректировать тяговые нагрузки в электрическом расчете на последующих шагах моделирования, уровня напряжения в узлах СТЭ, потерь и расхода электроэнергии, а также значений коэффициента реактивной мощности. Предложенный метод позволяет повысить

точность тяговых и электрических расчетов и может применяться при моделировании СТЭ, в частности, при рассмотрении различных схем питания и секционирования и вариантов усиления СТЭ, а также для оценки эффективности применения различных устройств, например, устройств поперечной и продольной компенсации.

## Список литературы

1. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст] / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с.
2. Марский, В. Е. Методика и программа расчета параметров многопроводных тяговых сетей переменного тока на ЭВМ серии ЕС [Текст] / В. Е. Марский. – М.: Трансэлектропроект, 1987. – 78 с.
3. Крюков, А. В. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / Крюков А. В., Закарюкин В. П., Абрамов Н. А. // Управление большими системами: Сб. тр. / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – М., 2010. – № 29. – С. 201 – 213.
4. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения [Текст] / Черемисин В. Т., Вильгельм А. С., Незевак В. Л. // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2014. – № 2. – С. 106 – 111.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Xie, S., Feng, J., & Zhang, G. Study on simulation traction load with regenerative braking. *Energy Procedia*, 14, p. 1299 – 1304. doi:10.1016/j.egypro.2011.12.1092.
7. Chen, T.-H., & Hsu, Y.-F. Systematized short-circuit analysis of a 2×25 kV electric traction network. *Electric Power Systems Research*, 47(2), p. 133 – 142. doi:10.1016/S0378-7796(98)00058-3.
8. Герман, Л. А. Матричный метод расчета системы тягового электроснабжения переменного тока с учетом системы внешнего электроснабжения [Текст] / Л. А. Герман // Наука и техника транспорта / Российская открытая акад. транспорта Московского гос. ун-та путей сообщения. – М. – 2004. – № 4. – С. 70 – 77.
9. Крюков, А. В. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики / Казанский гос. энергетический ун-т. – Казань, 2008. – № 3(4). – С. 134 – 139.
10. Кишкурно, К. В. Эффективность регулирования напряжения трансформатора тяговой подстанции переменного тока [Текст] / К. В. Кишкурно, Л. А. Герман // Электроника и электрооборудование транспорта / ООО «Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод». – М, 2013. № 5. С. 26 – 30.
11. Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения [Текст] / В. Е. Марский // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / ВНИИЖТ. – М. – 2014. – № 1. – С. 40 – 46.
12. Быкадоров, А. Л. Методика и алгоритмы расчета сложных схем тягового электроснабжения [Текст] / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Трансэлектропроект: Инструктивно-методические указания. – 1981. – № 3. – С. 53 – 72.

## References

1. K. G. Markvardt. *Spravochnik po elektrosnabzheniiu zheleznnykh dorog* (Handbook of railway power supply). Moscow: Transport, 1980, 256 p.
2. Marskiy V. E. The methodology and program for calculating the parameters of multi-lane traction AC networks by computer series EU [Metodika i programma rascheta parametrov mnogoprovodnykh tiagovykh setei peremennogo toka na EVM serii ES]. *Transelektroproekt – Transelektroproekt*, 1985, no. 2, pp. 4 – 42.

3. Kriukov A. V., Zakariukin V. P., Abramov N. A. Management systems of traction current railways [Upravlenie sistemami tiagovogo elektrosnabzheniia zheleznykh dorog]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Managing large systems*, 2010, no. 29, pp. 201 – 213.
4. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Evaluation of technical losses in traction network in terms of application of electric rolling regenerative braking [Otsenka tekhnologicheskikh poter' v tiagovoi seti v usloviakh primeneniia elektropodvizhnym sostavom rekuperativnogo tormozheniia]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universitetata putei soobshcheniia – Herald of Rostov State University of Railway Transport*, 2014, no. 2, pp. 106 – 111.
5. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty* (Terms traction calculations for train operation), Moscow: Transport, 2010.
6. Xie S., Feng J., Zhang, G. Study on simulation traction load with regenerative braking, *Energy Procedia*, 2012, no. 14, pp. 1299 – 1304. doi:10.1016/j.egypro.2011.12.1092.
7. Chen T.-H., Hsu Y.-F. Systematized short-circuit analysis of a 2×25 kV electric traction network, *Electric Power Systems Research*, 1998, no. 47(2), pp. 133 – 142. doi:10.1016/S0378-7796(98)00058-3.
8. German L. A. Matrix method of calculation of traction power supply AC with the external power supply system [Matrichnyi metod rascheta sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia peremennogo toka s uchetom sistemy vneshnego elektrosnabzheniia]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and technology Transport*, 2004, no. 4, pp. 70 – 77.
9. Kriukov A. V., Zakariukin V. P., Astashin S. M. Simulation systems of AC railway power supply [Modelirovanie sistem elektrosnabzheniia zheleznykh dorog peremennogo toka]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – News of higher educational institutions. Energy problems*, 2008, no. 3 – 4, pp. 134 – 139.
10. Kishkurno K. V., German L. A. Efficiency of voltage regulator of AC traction substation [Effektivnost' regulirovaniia napriazheniia transformatora tia-govoi podstantsii peremennogo toka]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical transport*, 2013, no. 5, pp. 26 – 30.
11. Marskiy V. E. Determination of the capacity of railroads in the traction power supply devices [Opredelenie propusknoi sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroistvam tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*, 2014, no. 1, pp. 40 – 46.
12. Bykadorov A. L., Domanskii V. T. The methodology and algorithms for calculating the complex schemes of traction power [Metodika i algoritmy rascheta slozhnykh skhem tiagovogo elektro-snabzheniia]. *Transelektroproekt: Instruktivno-metodicheskie ukazaniia – Transelectroproject: Instructions and guidelines*, 1981, no. 3, pp. 53 – 72.

УДК 621.331

В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены вопросы применения технологий интеллектуальных сетей (smart grid) для управления качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. Описана структура интеллектуальной системы тягового электроснабжения. Дана классификация технических средств управления режимами системы тягового электроснабжения и качеством электроэнергии. Предложен алгоритм моделирования режимов интеллектуальных электроэнергетических систем, питающих электротяговые нагрузки, отличающийся тем, что в его основу положено совместное использование имитационных и динамических моделей активных элементов smart grid. Результаты моделирования подтверждают применимость разработанных методов для решения задач управления качеством электроэнергии.

В электрических сетях, питающих тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог, а также в системах тягового электроснабжения (СТЭ) в полном объеме применимы технологии интеллектуальных сетей (smart grid) [1] – [7], на основе которых можно эффективно решать задачи управления качеством электроэнергии [8]. Особую актуальность вопрос использования этих технологий приобретает в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с ТП железнодорожных магистралей. Из-за значительного объема резкопеременной нелинейной однофазной тяговой нагрузки показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в этих сетях превышают допустимые пределы.

Структура интеллектуальной системы тягового электроснабжения (ИСТЭ) показана на рисунке 1. ИСТЭ включает в свой состав следующие сегменты:

- развитые комплексы, обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования, включая устройства, работающие в режиме on line;
- автоматические устройства управления, построенные на основе цифровых технологий;
- пофазно управляемые источники реактивной мощности;
- установки распределенной генерации [9] и накопители электроэнергии [6];
- комплекс устройств для улучшения качества электроэнергии, включающий в себя активные кондиционеры гармоник (АКГ), симметрирующие трансформаторы и другие устройства.

Классификация технических средств управления режимами СТЭ проиллюстрирована схемой, представленной на рисунке 2. Следует отметить многофункциональность значительной части из представленных на рисунке 2 устройств. Так, например, установки FACTS, имеющие пофазное (векторное) управление, могут эффективно применяться не только для стабилизации уровней напряжения, но и для снижения несимметрии в питающих сетях, а также в сетях районов электроснабжения нетяговых потребителей. Накопители электроэнергии будут способствовать снижению потерь в тяговой сети (ТС) и уменьшать отклонения и колебания напряжений.

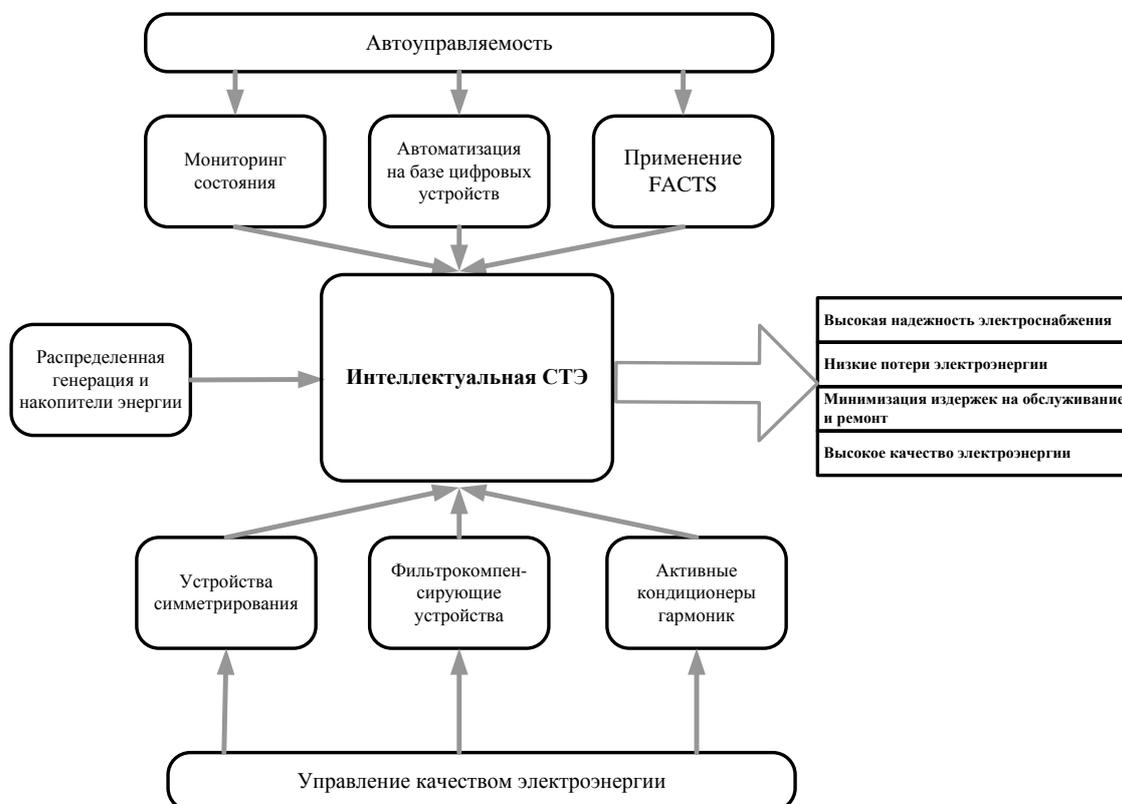


Рисунок 1 – Структура интеллектуальной системы тягового электроснабжения



Рисунок 2 – Классификация средств управления режимами СТЭ:

FACTS (flexible alternative current transmission systems) – комплекс технических и информационных средств автоматического управления режимами; АКГ – активный кондиционер гармоник; ВГ – высшие гармоники; ВДТА – вольтодобавочный трансформаторный агрегат, разработанный в УрГУПСе; ВИП – вставка постоянного тока; НЭ – накопитель электроэнергии; РГ – распределенная генерация; СТ – симметрирующий трансформатор; ТОУ – токоограничивающее устройство

Возможные места размещения исполнительных устройств в СТЭ показаны на схеме рисунка 3. Надо отметить, что размещение полного комплекса средств smart grid на каждой тяговой подстанции по экономическим и технологическим соображениям неприемлемо, так как функции многих устройств могут дублировать друг друга.

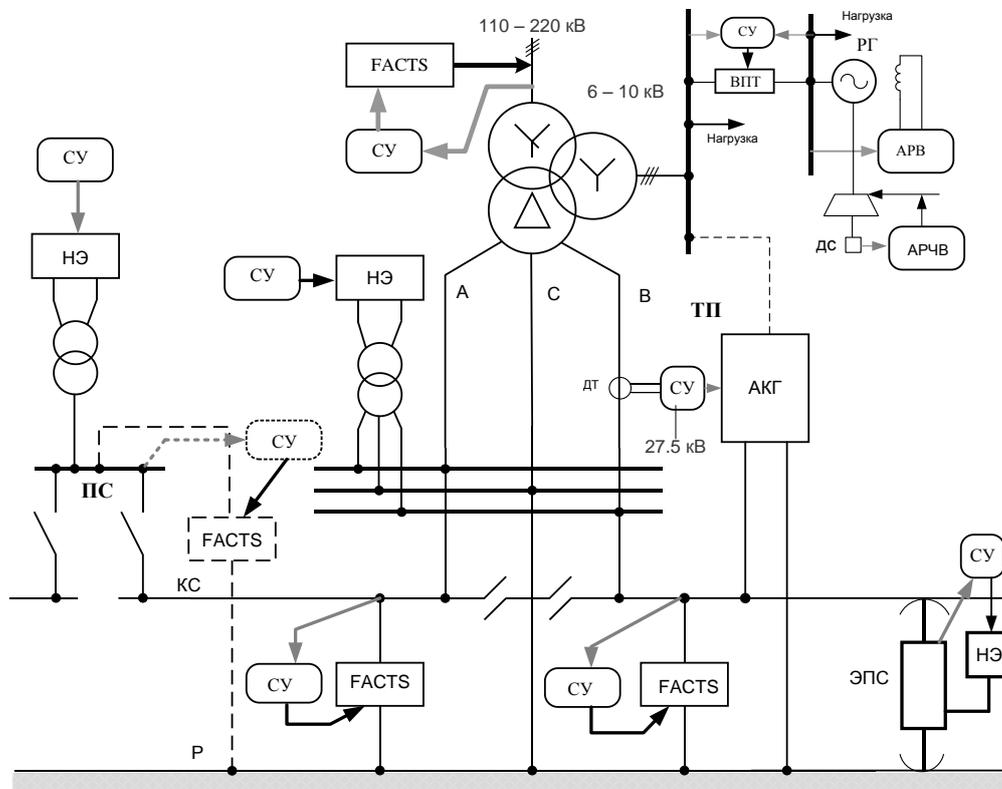


Рисунок 3 – Возможные места установки интеллектуальных устройств управления режимами СТЭ: АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения; СУ – система управления; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости

В работе [7] предложен метод комплексного моделирования СТЭ, построенной с использованием технологий smart grid. При этом моделирование разбивается на два этапа, в каждом из которых используются разные модели электроэнергетических систем (ЭЭС) и СТЭ. На первом этапе применяется технология имитационного моделирования, разработанная в ИрГУПСе [10, 11]. В результате моделирования определяются экстремальные значения тяговых нагрузок, а также потоков мощности на вводах 110 – 220 кВ ТП, которые затем используются при построении динамических моделей интеллектуальных сетей на основе средств программной системы Matlab. Кроме того, на первом этапе могут быть решены вопросы, связанные с моделированием электромагнитной обстановки в СТЭ [12].

Разработанный алгоритм имеет две параллельных ветви, включающие в себя следующие блоки:

имитационное моделирование исходного базового режима в комплексе «Fazonord – качество» [11, 12] и определение на этой основе электротяговых нагрузок в виде зависимостей  $P_k = P_k(t)$ ,  $Q_k = Q_k(t)$ ; вычисление минимальных, средних и максимальных характеристик полученных зависимостей;

формирование имитационных и динамических моделей ЭЭС и СТЭ с учетом активных элементов smart grid и проведение моделирования с получением результатов в виде зависимостей коэффициентов несимметрии и несинусоидальности от времени, а также статистических характеристик;

анализ и обобщение полученных результатов.

Каждый из описанных выше подходов к моделированию ЭЭС и СТЭ с активными элементами smart grid обладает определенными преимуществами и ограничениями, и только на основе их комплексного использования можно получить адекватный результат.

Указанные ограничения, а также различия в технологиях моделирования элементов smart grid с помощью имитационных и динамических моделей могут приводить к некоторым различиям в результатах определения параметров режима, в частности, показателей качества электроэнергии по несинусоидальности. Поэтому о совпадении результатов можно говорить в рамках теоретико-множественного подхода как о принадлежности некоторой ограниченной области пространства параметров. В общем случае условие совпадения может быть записано как  $G_1 \cap G_M \approx 0$ , где  $G_1$ ,  $G_M$  – множества режимных параметров, полученных соответственно в результате имитационного и динамического моделирования.

В результате проведенных исследований разработаны математические и компьютерные модели активных элементов smart grid, реализуемых в рамках предложенного подхода. Перечень разработанных моделей представлен в таблице, где в колонке F обозначены элементы, моделируемые в системе Fazonord, M – моделируемые в системе MatLab.

Разработанные модели элементов smart grid

Наименование элемента	F	M
ЛЭП повышенной пропускной способности	+	–
Управляемые ЛЭП	+	–
Симметрирующие трансформаторы	+	–
Установки распределенной генерации	+	+
Вставки постоянного тока	+	+
Пофазно управляемые средства компенсации реактивной мощности, выполненные по технологии FACTS	+	+
Активные кондиционеры гармоник	+	+

Ниже приведены результаты моделирования режимов реальной сети 220 кВ, питающей тяговые подстанции одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири. Цель моделирования заключалась в анализе эффективности применения пофазно управляемых устройств FACTS для уменьшения несимметрии. Рассматривалось две структурные схемы устройства:

- FACTS, силовые элементы которого включены по схеме «звезда»;
- FACTS с элементами, включенными по схеме «треугольник».

Результаты моделирования, представленные на рисунке 4, позволяют сделать следующие **ВЫВОДЫ:**

при отсутствии средств управления режимами коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности превышает нормально допустимые пределы;

установка FACTS на шинах 220 кВ одной из тяговых подстанций позволяет ввести показатели качества электроэнергии в допустимые пределы;

применение FACTS с силовыми блоками, соединенными в «треугольник», обеспечивает лучшее симметрирование.

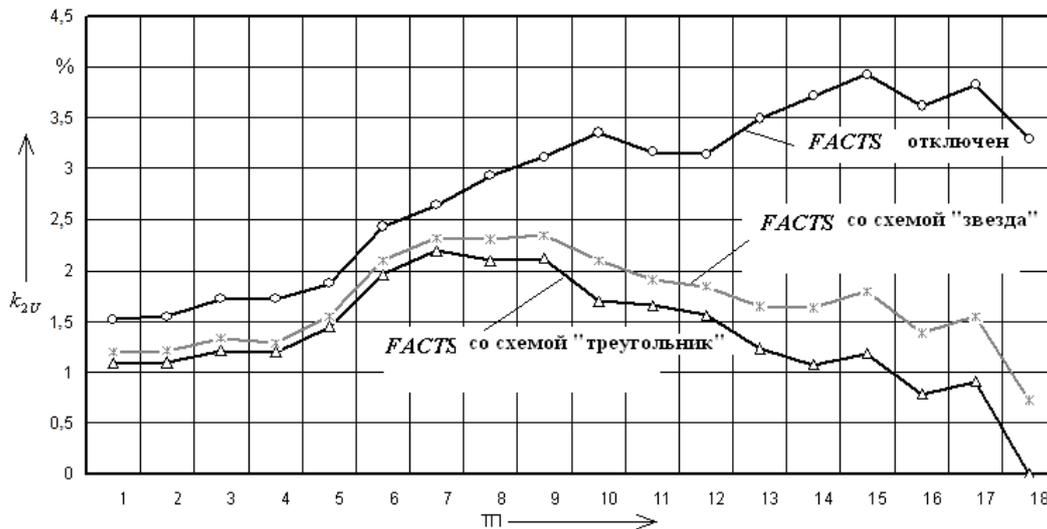


Рисунок 4 – Максимальные значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП

Второй пример иллюстрирует методику моделирования активных кондиционеров гармоник. Фрагмент расчетной схемы, включающей в себя модели питающей сети 220 кВ и СТЭ 2×25 кВ, представлен на рисунке 5. В качестве моделей АКГ были использованы резонансные схемы, обладающие большим сопротивлением на основной частоте и заземляющие узел подключения на частотах высших гармоник [7]. Проведенные многовариантные расчеты режимов при движении поездов с выбором мест расстановки пассивных фильтров и АКГ привели к следующим выводам.

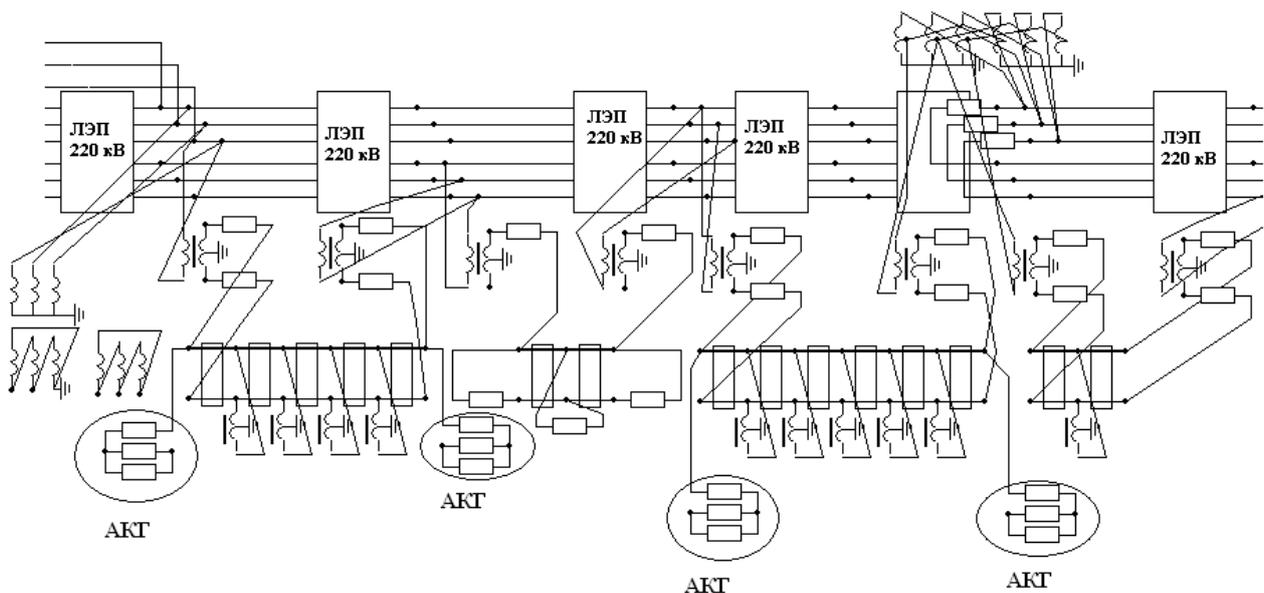


Рисунок 5 – Фрагмент расчетной схемы

Во-первых, размещение фильтров третьей и пятой гармоник на подстанциях с максимальной несинусоидальностью приводит к резонансному росту гармоник более высоких порядков на удалении трех – четырех межподстанционных зон. Во-вторых, размещение АКГ на межподстанционных зонах подстанций с наибольшей несинусоидальностью приводит к росту уровня гармоник на удаленных тяговых подстанциях. В-третьих, включение АКГ на шинах питания фидеров тяговой сети  $2 \times 25$  кВ достаточно только для фидера контактной сети, без включения второго АКГ на фидер питающего провода. В итоге выбор мест размещения фильтров или АКГ проводился путем многовариантного подбора с целью минимизации несинусоидальности на всем протяжении анализируемого участка железной дороги.

При моделировании режимов работы системы электроснабжения участка дороги использованы следующие варианты:

- АКГ и фильтры отсутствуют;
- выбраны места размещения и установлены модели АКГ с двух сторон восьми межподстанционных зон.

Основные результаты моделирования, представленные на рисунках 6 и 7, позволяют сделать следующие выводы:

при отсутствии средств подавления высших гармоник коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения  $k_U$  на шинах 220 кВ десяти тяговых подстанций превышают предельно допустимые значения;

установка АКГ на вводах 27,5 кВ тяговых подстанций с двух сторон восьми межподстанционных зон обеспечивает снижение  $k_U$  до допустимых значений.

Третий пример посвящен вопросам улучшения качества напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей, питающихся по линиям «два провода – рельс» (ДПР). Линии автоблокировки и продольного электроснабжения, проложенные по опорам контактной сети (КС), подвержены электрическому и магнитному влиянию КС. Электрическое влияние КС создает напряжение нулевой последовательности на проводах линий 6-10-35 кВ, искажает учет электрической энергии на головных участках технологических ЛЭП, выполненных по схеме ДПР, но не приводит к увеличению доли высших гармоник. Существенное возрастание уровня несинусоидальности в смежных линиях ДПР возможно из-за пропорциональности наводимого напряжения магнитного влияния частоте влияющего тока.

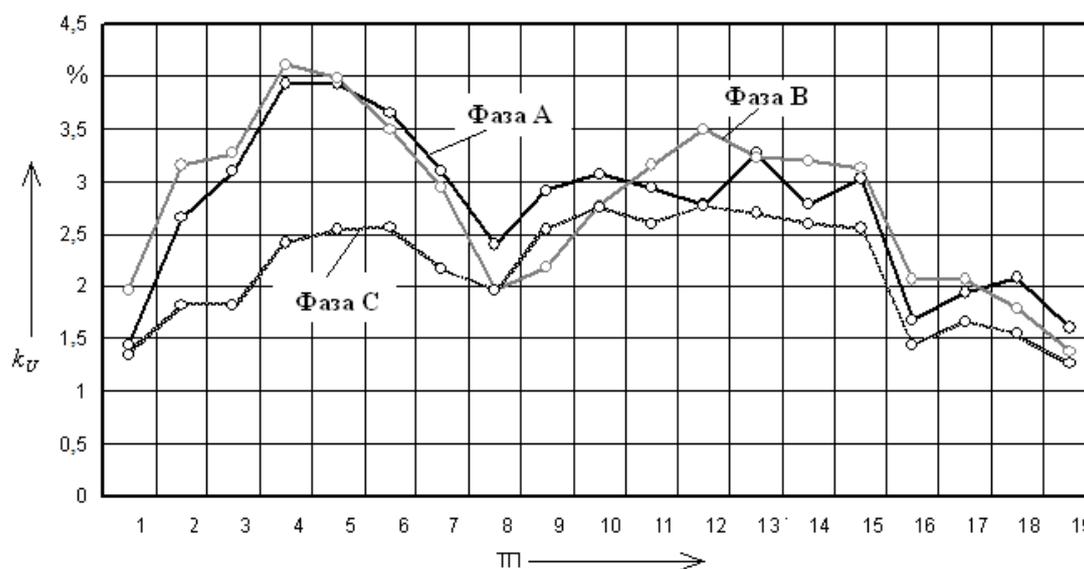


Рисунок 6 – Коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения на шинах 220 кВ тяговых подстанций. АКГ отключены

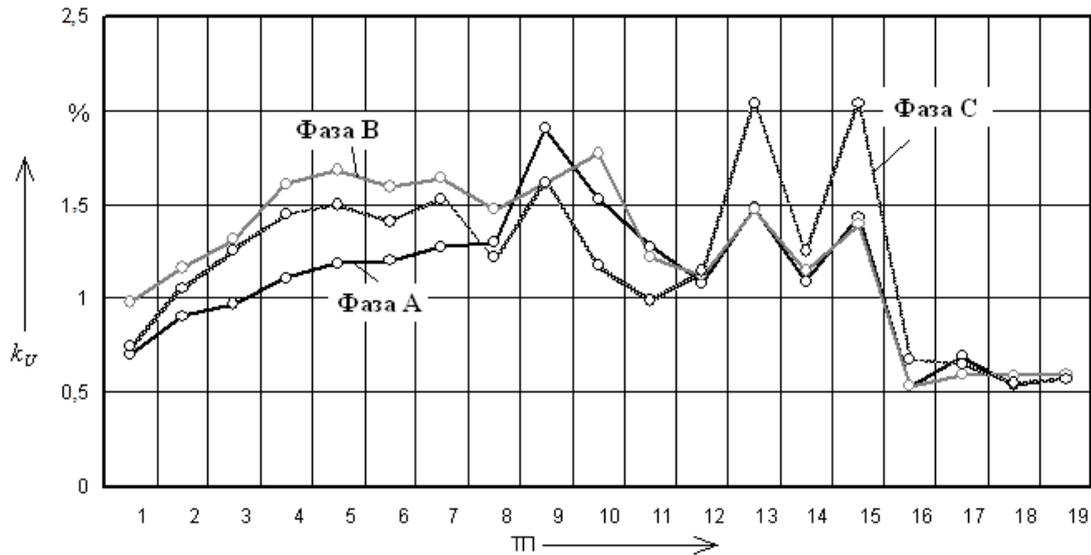


Рисунок 7 – Коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения на шинах 220 кВ тяговых подстанций. АКГ включены

Анализ влияния КС на качество электроэнергии (ЭЭ) проводился применительно к двухпутному участку железной дороги с электрификацией по системе  $1 \times 25$  кВ, схема которого показана на рисунке 8. Межподстанционная зона (МПЗ) длиной 54 км между подстанциями ТП-1 и ТП-2 получает питание по двухцепной ЛЭП 220 кВ. Продольное электроснабжение осуществляется по линии ДПР со стандартным расположением проводов. Моделировалось движение поездов массой 4000 т.

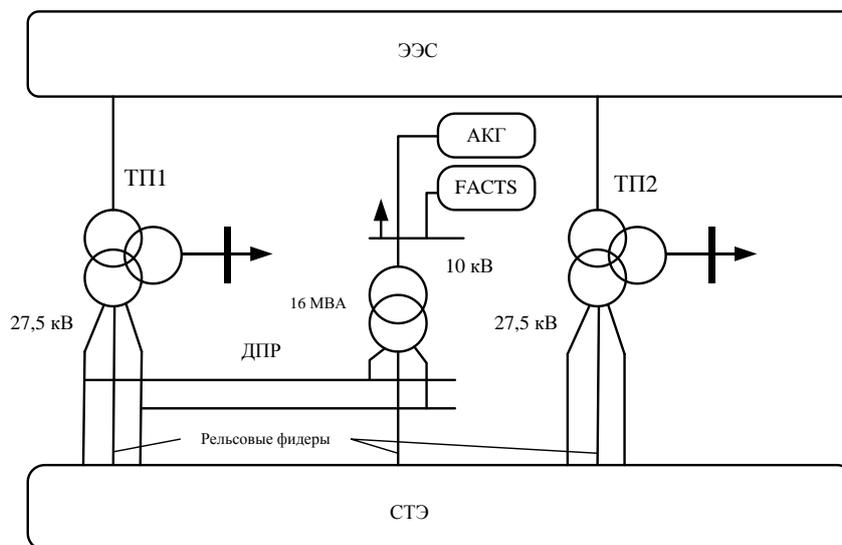


Рисунок 8 – Схема сетей, питающих район электроснабжения нетяговых потребителей (РЭС)

Тяговая нагрузка консольной МПЗ приводит к значительным отклонениям напряжения в конце линии ДПР. Основной причиной отклонений является магнитное влияние КС. Разные отклонения фазных напряжений приводят к существенной несимметрии. На рисунке 9 показана динамика изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности для подстанции, подключенной к ЛЭП ДПР.

Увеличение доли высших гармоник при магнитном влиянии приводит к серьезному повышению несинусоидальности напряжений в линии ДПР. Коэффициент несинусоидальности фазы В достигает 30 %, а фазы В – 18 % (рисунок 10).

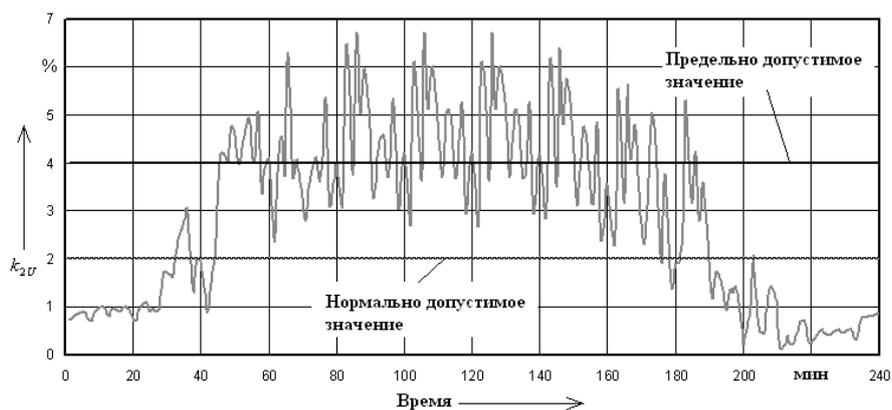


Рисунок 9 – Изменение коэффициента несимметрии по обратной последовательности при отсутствии средств улучшения качества ЭЭ

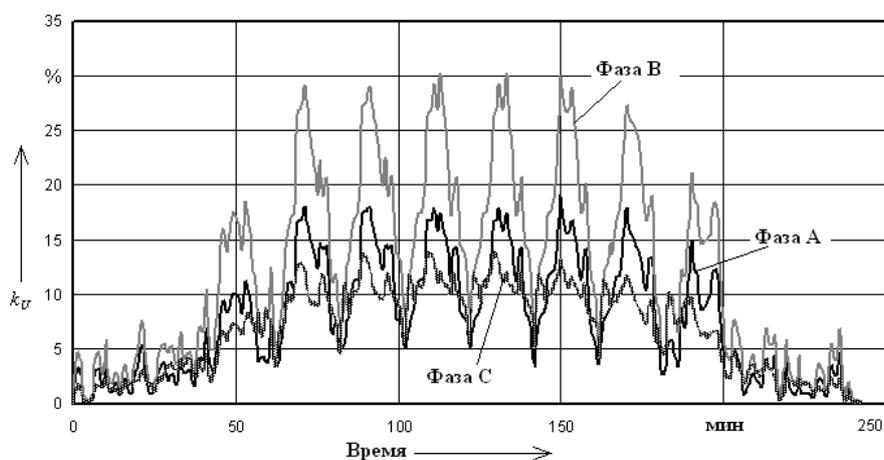


Рисунок 10 – Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на шинах 27,5 кВ ТП-ДПР2

Решение проблемы нормализации качества ЭЭ может быть выполнено на основе применения технологий интеллектуальных сетей. Для снижения несимметрии могут использоваться пофазно управляемые устройства FACTS, а для уменьшения гармонических искажений – активные кондиционеры гармоник. Для моделирования этих устройств использовались функционально-адекватные модели, реализованные на основе фазных координат [7, 10]. Моделирование осуществлялось на основе комплекса программ «Fazonord – качество», разработанного в ИрГУПСе [11]. Результаты моделирования проиллюстрированы на рисунках 11, 12.

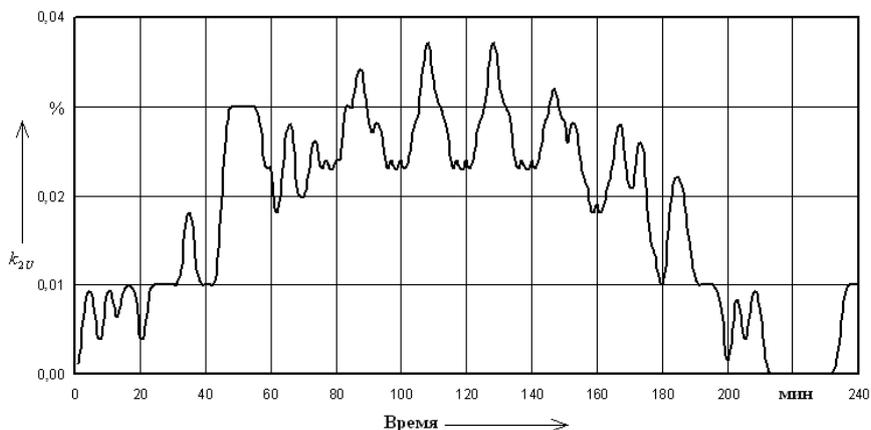


Рисунок 11 – Изменение коэффициента несимметрии по обратной последовательности при наличии пофазно управляемого устройства FACTS

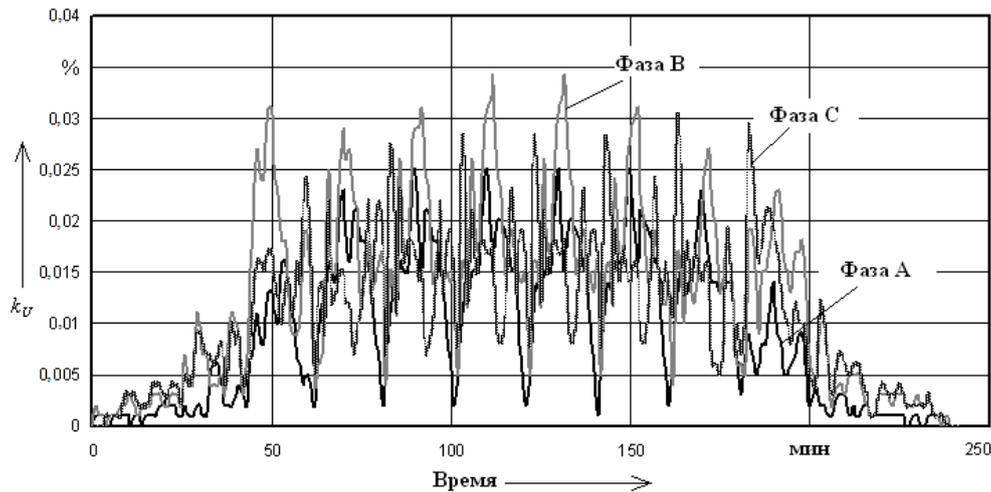


Рисунок 12 – Изменение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при наличии АКГ

Разработанные методы и алгоритмы моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог переменного тока, построенных с использованием технологий smart grid, позволяют решать задачи управления качеством электроэнергии в СТЭ.

При решении задач управления необходимо учитывать следующее:

система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока представляет собой сложную нелинейную динамическую многоуровневую структуру, что создает трудности, связанные с непрерывным изменением, вызванным тяговыми нагрузками, перемещающимися в пространстве, не только численных значений коэффициентов, но и структуры реализуемой модели;

наличие активных элементов, используемых в технологиях smart grid, еще более усложняет формирование адекватных моделей активно-адаптивных сетей, питающих электротяговые нагрузки.

Для преодоления указанных затруднений предложено использовать методы декомпозиции, при этом моделирование разбивается на два этапа, в каждом из которых используются разные модели. На первом этапе применяется технология имитационного моделирования, результаты которого затем используются при построении динамических моделей.

Разработанный алгоритм комплексного моделирования интеллектуальных СТЭ может эффективно использоваться при решении задач проектирования и эксплуатации СТЭ, построенных с использованием технологий smart grid.

Проблемы улучшения качества электроэнергии и повышения энергоэффективности в электротяговых сетях могут быть решены на основе создания интеллектуальных систем тягового электроснабжения.

Наиболее эффективные направления использования современных технических средств для управления режимами СТЭ заключаются в сочетании регулируемых источников реактивной мощности, накопителей энергии, активных кондиционеров гармоник и установок распределенной генерации.

### Список литературы

1. Дорофеев, В. В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России [Текст] / В. В. Дорофеев, А. А. Макаров // Энергоэксперт, 2009. – № 4. – С. 29 – 34.
2. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции smart grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М.: ИАЦ, 2010. – 208 с.
3. Использование устройств FACTS в системах внешнего электроснабжения железных дорог [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 1 (33). – С. 267 – 274.

4. Крюков, А. В. Повышение эффективности оперативного управления в системах тягового электроснабжения [Текст] / А. В. Крюков, В. А. Алексеенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2011. – № 4 (32). – С. 158 – 164.
5. Крюков, А. В. Моделирование активных элементов интеллектуальных сетей в фазных координатах [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, В. А. Алексеенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 2 (34). – С. 99 – 105.
6. Закарюкин, В. П. Применение накопителей энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2014. – № 2 (42). – С. 158 – 164.
7. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков и др. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – 129 с.
8. Управление качеством электроэнергии [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский и др. / Московский энергетический ин-т. – М., 2006. – 320 с.
9. Крюков, А. В. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, М. О. Арсентьев // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск. – 2009. – Т. 37. – № 1. – С. 190 – 195.
10. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2005. – 273 с.
11. Крюков, А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2011. – 170 с.
12. Крюков, А. В. Моделирование электромагнитной обстановки на железных дорогах переменного тока [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. В. Буякова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2010. – № 2. – С. 169 – 175.

## References

1. Dorofeef V. V., Makarov A. A. Active-adaptive network – the new quality of Russian energy system [Aktivno-adaptivnaja set' – novoe kachestvo EJeS Rossii]. *Energoexpert – Energyexpert*, no. 4, 2009, pp. 29 – 34.
2. Kobets B. B., Volkova I. O. *Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii smart grid* (Innovation electro energetic improvement on smart grid basis). Moscow, 2010, 208 pp.
3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Ushakov V. F., Alekseenko V. A. Using FACTS in railway external electric supply [Ispolzovanie ustroystv FACTS v sistemah vneshnego electrosnabzhenia zheleznih dorog]. *Sovremennije tehnologii. Systemnij analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2012, no. 1 (33), pp. 267 – 274.
4. Kryukov A. V., Alekseenko V. A. Increase of operative control effectiveness in traction electric supplying systems [Povishenie effektivnosti operativnogo upravlenija v sistemah tyagovogo elektrosnabgenija]. *Sovremennije tehnologii. Systemnij analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2011, no. 4(32), pp. 158 – 164.
5. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Alekseenko V. A. Modelling of smart grid active units in phase domain [Modelirovanie aktivnih elementov intellektualnih setey v faznih koordinatah]. *Sovremennije tehnologii. Systemnij analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2012, no. 2 (34), pp. 99 – 105.
6. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Cherepanov A. V. Energy capacitors using in traction electric supplying systems of alternative current [Primenenie nakopiteley energii v sistemah tyagovogo elektrosnabgenija zheleznih dorog peremennogo toka]. *Sovremennije tehnologii. Systemnij*

*analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2014, no. 2 (42), pp. 158 – 164.

7. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Ushakov V. F., Alekseenko V. A. *Operativnoe upravlenie v sistemah elektrosnabgenia zheleznih dorog* (Operative control in railway electric supplying systems). Irkutsk, 2012, 129 pp.

8. Kartashev I. I., Tul'skiy V. N., Shamonov R. G., Sharov Yu. V., Vorobiev A. Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* (Electric energy quality control). Moscow, 2006, 320 pp.

9. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Arsentiev M. O. Distributed generation technology for electric power supplying of non-traction railway customers [Primenenie tehnologiy raspredelennoy generatsii dlya elektrosnabgenia netyagovih potrebiteley zheleznih dorog]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta – Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2009, T. 37, no. 1, pp. 190 – 195.

10. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy jelektricheskikh sistem* (Multi asymmetrical modes of electric systems). Irkutsk, 2005, 273 pp.

11. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tjavovogo i vneshnego jelektrosnabzheniya zheleznih dorog peremennogo toka* (Traction and external electric systems mutual modelling methods of alternative current' railway). Irkutsk, 2011, 170 pp.

12. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Buyakova N. V. Electromagnetic environment modelling in alternative current' railway [Modelirovanie elektromagnitnoi obstanovki na zheleznih dorogah peremennogo toka] *Sovremennye tehnologii. Systemniy analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2010, no. 2, pp. 169 – 175.

УДК 621.331:621.311

Ю. В. Москалев

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И МОЩНОСТИ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРАФИКАМИ НАГРУЗОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В статье рассмотрен способ управления графиками электрических нагрузок железнодорожных потребителей с использованием накопителей энергии. Рассмотрены различные типы накопителей энергии, используемые на железнодорожном транспорте. Выполнена постановка оптимизационной задачи, выбраны критерии и метод для ее решения. В качестве оптимизационного метода использован метод Хука – Дживса. Предложен способ для определения оптимальных параметров и оптимального закона управления зарядом и разрядом стационарного накопителя энергии. Приведены критерии и расчетные выражения, которые могут быть использованы при проектировании и технико-экономическом обосновании эффективности внедрения стационарного накопителя энергии для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей. Предложено математическое выражение для определения энергоемкости накопителя по известному закону изменения его мощности. Приведены результаты решения оптимизационной задачи для двух критериев – минимума потерь активной мощности и минимума приведенных затрат, выполнено сравнение результатов. Для количественной оценки изменения графика электрических нагрузок использованы коэффициенты формы и максимума. Указано на возможность управления графиком реактивной мощности в электрической сети переменного тока с использованием полупроводниковых преобразователей и накопителя энергии. Рассмотрен вариант по использованию литий-титанатного химического источника тока в качестве накопителя энергии для железнодорожных потребителей. В результате оптимального управления графиками электрических нагрузок будет получен технический и экономический эффект.

Основной целью энергетической стратегии ОАО «РЖД» является повышение энергетической эффективности во всех сферах деятельности компании [1]. Одним из инновационных технических средств снижения расхода электрической энергии на тягу и в стационарной энергетике является накопитель энергии (НЭ), рациональное применение которого позволяет получить ряд технических и экономических эффектов.

Использование НЭ для снижения расхода и улучшения качества электроэнергии целесообразно в системах электроснабжения различного назначения, в которых

присутствует перераспределение (перетоки) энергии (обмен электромагнитной энергией между узлами в сети переменного тока, изменение схемы электрической сети, генерирующих мощностей и нагрузок узлов);

потребление электроэнергии изменяется во времени;

возможно появление избыточной энергии рекуперации (системы тягового электроснабжения постоянного тока).

Для использования в таких приложениях НЭ должны иметь большую энергоемкость и мощность в сравнении с химическими источниками тока, работающими в буферном режиме на электростанциях, подстанциях, подвижном составе. Например, для сохранения избыточной энергии рекуперации ЭПС грузового поезда массой 6400 т необходим НЭ с энергоемкостью 50 – 100 кВт·ч и мощностью 7,5 МВт [2], для стационарного устройства в системе тягового электроснабжения постоянного тока эти показатели 40 – 70 кВт·ч и 1,5 – 3 МВт [3].

Емкие НЭ должны иметь высокий КПД (более 0,9) в циклическом режиме работы, значительный ресурс (сотни тысяч циклов заряда-разряда), широкий диапазон рабочих температур, приемлемые массогабаритные показатели, а также они должны быть надежными и безопасными.

Каждая из существующих технологий накопления энергии [4] имеет свои преимущества и недостатки, для различных практических приложений может быть выбран наиболее подходящий вид накопителя. В таблице 1 приведены некоторые типы НЭ, которые в настоящее время используются на железнодорожном транспорте или существуют проекты по их применению в будущем.

Таблица 1 – Основные показатели накопителей различных типов

Тип НЭ	Удельная мощность, Вт / кг	Удельная энергия, Вт·ч / кг	КПД, %	Ресурс, циклы
Свинцово-кислотный аккумулятор	5 – 350	30 – 50	60 – 85	200 – 800
Никель-кадмиевый аккумулятор	50 – 400	35 – 60	70 – 80	300 – 2000
Литий-железофосфатный аккумулятор	20 – 300	90 – 110	75 – 85	500 – 2500
Литий-титанатный аккумулятор	300 – 800	50 – 60	80 – 85	$(8-10) \cdot 10^3$
Суперконденсатор	1 500	2 – 10	90 – 95	1 000 000
Супермаховик	400 – 600	100 – 500	70 – 95	$10^4 - 10^6$
Сверхпроводниковый индуктивный НЭ	более 10 000	1 – 10	95 – 97	до $10^{12}$
Природный газ	—	15 000	—	—

Управление графиками нагрузок тяговых подстанций (ТП) и стационарных железнодорожных потребителей (локомотивных, вагонных депо) позволит получить ряд технических и экономических эффектов, среди которых снижение потерь электроэнергии, уменьшение колебаний и отклонений напряжения, резервирование электроснабжения, снижение цены на электроэнергию (при рациональной тарифной политике снабжающей организации).

Для сглаживания графика нагрузки ТП ( $k_{\phi} = 1$ , где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы) необходим НЭ с энергоемкостью 22 300 – 41 700 кВт·ч [5]. Устройство с такой энергоемкостью может быть реализовано технически, но экономический эффект будет только по истечении десятков лет, поэтому необходимо управлять графиком нагрузки ТП таким образом, чтобы получить технический и экономический эффект.

Рассмотрим подход, позволяющий определять энергоемкость и мощность НЭ, предназначенного для управления графиком любого потребителя электроэнергии. В качестве примера рассмотрим схему электроснабжения вагонного депо с НЭ (рисунок 1) и суточный график активной мощности с осреднением один час (рисунок 2). Для количественной оценки группового графика нагрузки использованы коэффициент формы ( $k_{\phi}$ ) и коэффициент максимума ( $k_{M}$ ).

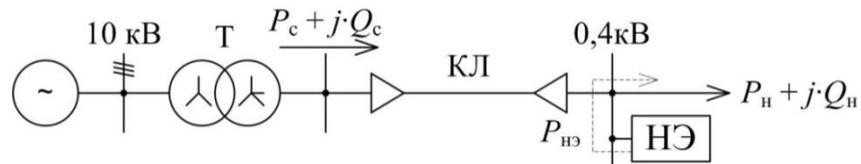


Рисунок 1 – Расчетная схема (КЛ – кабельная линия)

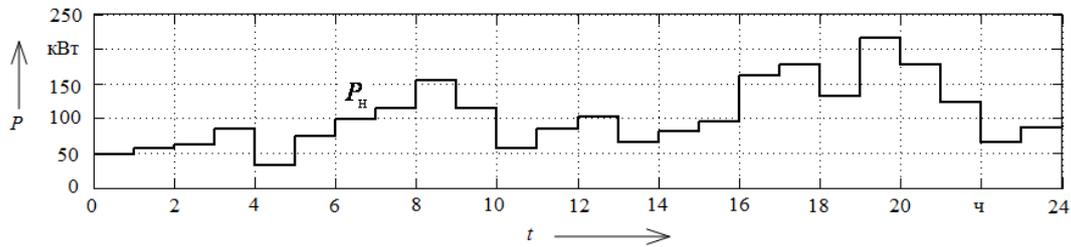


Рисунок 2 – Суточный график активной мощности потребителя

При моделировании использовано допущение о неизменности действующего значения напряжения в узле подключения НЭ ( $U_c = 400$  В), КПД НЭ равен 1, трехфазная сеть симметричная, рассматривается только основная частота питающего напряжения.

Сумма активного сопротивления короткого замыкания понижающего трансформатора, приведенного к низкому напряжению, и активного сопротивления жилы КЛ принята равной  $R_c = 0,03$  Ом.

При решении задачи рассмотрим два критерия, учитывающих технические и экономические показатели (таблица 2).

Таблица 2 – Используемые при решении оптимизационной задачи критерии

Критерий	Аналитическое выражение
Минимум потерь активной мощности в сети	$\Delta P = \frac{R_c \sum_{i=1}^{24} (P_{ni} + P_{HЭi})^2}{U_c^2}$
Минимум приведенных затрат	$Z = 365 \left( \frac{k_3 R_c}{U_c^2 \cdot 10^3} \sum_{i=1}^{24} \left( \frac{W_{ni} \cdot 10^3 + W_{HЭi} \cdot 10^3}{t_{ni}} \right)^2 t_i \right) + \left( E_n k_{HЭ} \sum_{i=1}^{24}  W_{HЭi}  + I \right)$

В таблице 2 приняты следующие обозначения:  $k_3$  – стоимость электроэнергии, р./кВт·ч;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $k_{HЭ}$  – удельная стоимость НЭ, р./кВт·ч;  $I$  – годовые эксплуатационные расходы, р.

Оптимизация выполняется при условии, что сумма запасенной и возвращенной накопителем энергии за рассматриваемый интервал времени (24 ч) равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{24} P_{HЭi} t_i = 0. \quad (1)$$

Для решения оптимизационных задач использован численный метод Хука – Дживса [6], позволяющий определять оптимум многомерной целевой функции (см. таблицу 2).

Ограничение в виде линейного равенства (1) учитывается следующим образом: уравнение (1) разрешается относительно одной из переменных, полученное выражение подставляется в целевую функцию [6]. Таким образом, размерность целевой функции становится меньше на единицу и решение задачи выполняется методом безусловной оптимизации.

В результате расчета получены оптимальный график изменения мощности НЭ  $P_{HЭ}(t)$  и график потребления активной мощности из электрической сети  $P_c(t)$  (рисунок 3).

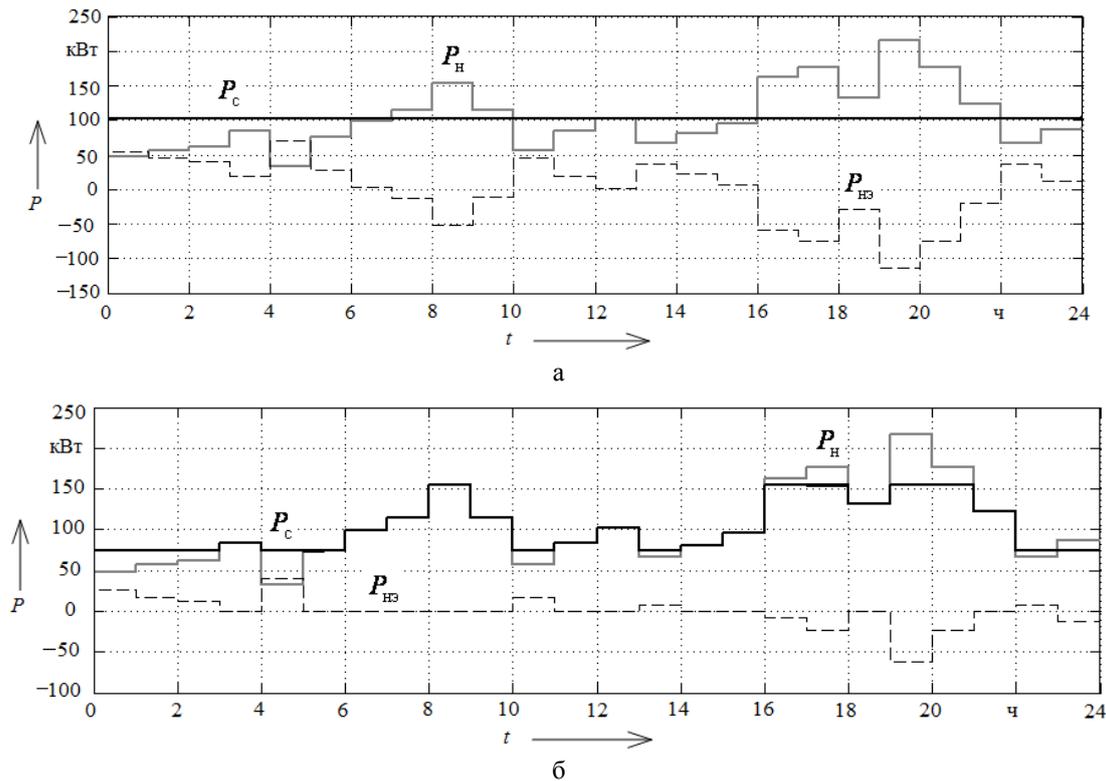


Рисунок 3 – Оптимальный график работы НЭ и графики потребления активной мощности из сети: критерии оптимизации по минимуму потерь активной мощности в сети (а) и по минимуму приведенных затрат (б)

На рисунке 3 отрицательные значения графика  $P_{нз}(t)$  соответствуют режиму разряда, положительные – режиму заряда НЭ.

При использовании критерия минимума потерь НЭ позволяет реализовать график активной нагрузки сети с неизменной мощностью, равной среднему значению активной мощности, поэтому в данном случае закон изменения  $P_{нз}(t)$  может быть определен по выражению:

$$P_{нз}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T P_n(t) dt - P_n(t), \quad (2)$$

где  $T$  – рассматриваемый интервал времени, ч.

С использованием критерия минимума потерь активной мощности можно определить энергоёмкость и мощность НЭ, применение которого позволит реализовать график потребления активной мощности из системы внешнего электроснабжения с неизменной мощностью. В этом случае потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения железнодорожных потребителей от передачи активной мощности будут наименьшими. Этот критерий не учитывает экономические затраты на приобретение и обслуживание технического средства, что может явиться причиной необоснованных экономических затрат.

Использование критерия минимума приведенных затрат учитывает капитальные затраты и эксплуатационные расходы (при решении задачи были приняты следующие экономические показатели:  $k_3 = 3$  р./кВт·ч;  $E_n = 0,1$ ;  $k_{нз} = 1000$  р./кВт·ч;  $I = 10\,000$  р.). Как видно из рисунка 3, б, в этом случае НЭ позволяет уменьшить пиковые нагрузки (заряд НЭ происходит в интервалы времени с минимальной нагрузкой, разряд – в интервалы времени с максимальной нагрузкой). Значения энергоёмкости и мощности устройства, получаемые в результате расчета, непосредственно зависят от удельной стоимости НЭ: при задании удельной мощности НЭ, равной нулю, решение задачи соответствует использованию критерия минимума потерь активной мощности, может быть определено и такое максимальное значение удельной стоимости накопителя, при котором можно будет получить экономический эффект. Удельная

стоимость НЭ в основном зависит от его типа (см. таблицу 1), для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей могут быть использованы относительно недорогие химические источники тока.

Энергоемкость НЭ должна быть определена с учетом того, что интервалы времени заряда (разряда) имеют различную длительность, в случае нескольких последовательно идущих интервалов заряда (разряда) запасаемая энергия будет равна сумме энергии каждого интервала (см. рисунок 3). Для определения энергоемкости предлагается использовать выражение:

$$W_{НЭ} = \max \left( P_{НЭ1}t_1, \sum_{i=1}^2 P_{НЭi}t_i, \dots, \sum_{i=1}^{24} P_{НЭi}t_i \right). \quad (3)$$

Таким образом, может быть определен максимальный объем энергии (энергоемкость НЭ), необходимый для реализации заданного закона изменения мощности  $P_{НЭ}(t)$ .

В таблице 3 приведены основные показатели и оптимальные параметры емкого НЭ.

Таблица 3 – Результаты расчета основных показателей и параметров НЭ с использованием различных критериев

Показатели и параметры НЭ	Исходный график $P_{н}(t)$	Критерий	
		$\Delta P \rightarrow \min$	$3 \rightarrow \min$
Снижение потерь активной мощности в сети, %	0,0	16,3	8,7
Среднее значение активной мощности за сутки, кВт	102,8	102,8	102,8
Эффективное значение активной мощности за сутки, кВт	112,5	102,8	107,4
Максимальное значение активной мощности за сутки, кВт	216,0	102,8	154,4
Коэффициент формы ( $k_{ф}$ )	1,09	1,00	1,04
Коэффициент максимума ( $k_{м}$ )	2,10	1,00	1,50
Энергоемкость НЭ, кВт·ч	–	317,7	120,0
Мощность НЭ при заряде, кВт	–	69,8	40,8
Мощность НЭ при разряде, кВт	–	113,2	67,7

В сетях переменного тока различных потребителей НЭ может обеспечить управление графиком активной и реактивной мощности. Как известно, посредством изменения алгоритмов управления полупроводниковыми ключами можно обеспечить любые режимы работы четырехквadrантного преобразователя, т. е. реализовать управляемый по требуемому закону источник тока или напряжения [7]. При этом для управления графиком реактивной мощности (генерации и потребления реактивной мощности) достаточно НЭ небольшой энергоемкости (сотни, тысячи джоулей), а управление графиком активной мощности требует использования емких НЭ различных типов (см. таблицу 1).

Основным ограничивающим фактором при использовании суперконденсаторов, маховиков и сверхпроводниковых индуктивных накопителей является их высокая стоимость (1 – 2 млн р. / кВт·ч). Технологии изготовления, например, суперконденсаторов интенсивно развиваются, увеличиваются объемы производства, при наличии конкуренции производителей стоимость суперконденсаторов будет приемлемой для применения в качестве емких НЭ.

Одной из перспективных технологий накопления энергии является химический источник тока (аккумулятор). В настоящее время существует большое количество различных видов химических источников тока. Основными ограничивающими факторами для использования химических аккумуляторов являются относительно низкий КПД (0,6 – 0,85) и небольшой ресурс в циклическом режиме (200 – 2500 циклов), при этом ресурс значительно зависит от глубины разряда аккумулятора.

Среди различных видов химических источников тока как один из вариантов для использования при реализации емкого НЭ может быть рассмотрен литий-титанатный аккумулятор, который имеет высокую энергетическую плотность (52 Вт·ч/кг), высокий КПД (около 0,85), самый большой ресурс из всех существующих химических аккумуляторов (10 000 циклов при глубине разряда 80 %) и относительно небольшую стоимость (40 – 60 тыс. р. / кВт·ч).

Ресурс литий-титанатных аккумуляторов может быть значительно увеличен при эксплуатации с глубиной разряда 10 – 15 %, что позволит увеличить срок службы НЭ в системах электроснабжения тяговых и нетяговых потребителей железнодорожного транспорта.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Управление суточными графиками нагрузок железнодорожных потребителей позволяет получить ряд технических и экономических эффектов, среди которых снижение потерь и улучшение качества электроэнергии, снижение цены на электроэнергию при выравнивании или смещении нагрузки потребителя в зону минимальной нагрузки системы электроснабжения.

2. Предложенный подход позволяет определить энергоемкость и мощность НЭ, необходимые для управления графиком активной мощности железнодорожного потребителя, а также интервалы времени, в которые необходимо заряжать и разряжать устройство.

3. Применение НЭ позволяет управлять графиками активной и реактивной мощности, генерация активной и реактивной мощности обеспечивается заданием необходимых законов управления ключами полупроводникового преобразователя, обеспечивающего согласование НЭ и сети переменного тока промышленной частоты.

4. Основным ограничивающим фактором применения емких НЭ для улучшения качества электроэнергии и повышения энергоэффективности систем электроснабжения различного назначения является высокая стоимость НЭ с требуемыми техническими показателями.

5. Для получения экономического эффекта удельная стоимость НЭ для низковольтных электрических сетей должна быть не более 2 000 р. / кВт·ч.

## 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. Авилов, В. Д. Определение энергоемкости накопителя энергии для грузового электроваза постоянного тока с использованием имитационного моделирования [Текст] / В. Д. Авилов, Ю. В. Москалев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская акад. водного транспорта. – Новосибирск. – 2013. – № 2. – С. 306 – 310.

3. Москалев, Ю. В. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока железных дорог с применением накопителей энергии [Текст] / Ю. В. Москалев, М. А. Карabanov // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 2 (14). – С. 51 – 58.

4. Накопители энергии [Текст] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

5. Носков, В. Н. Об энергоемкости накопителей энергии для стационарного размещения на тяговых подстанциях [Текст] / В. Н. Носков, М. Ю. Пустоветов, В. К. Чирков // Известия РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2008. – № 1. – С. 120 – 127.

6. Банди, Б. Д. Методы оптимизации. Вводный курс [Текст] / Б. Д. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

7. Электрические и электронные аппараты. Силовые электронные аппараты [Текст] / Ю. К. Розанов, Е. Г. Акимов и др. – М.: Академия, 2010. – Т. 2. – 320 с.

## References

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

2. Avilov V. D., Moskalev Yur. V. An energy storage device parameters determination for electrical locomotives of DC railway with using imitating modeling [Opredelenie jenergoemkosti nakopitelja jenerгии dlja gruzovogo jelektrovoza postojannogo toka s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovani-ja]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2013, no. 2, pp. 306 – 310.

3. Moskalev Yur. V., Karabanov M. A. Increasing efficiency of traction network DC railway using energy storage devices [Povyshenie jenergojeffektivnosti sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija

postojannogo toka zheleznyh dorog s primeneniem nakopitelej jenergii]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 2 (14), pp. 51 – 58.

4. But D. A., Alievskij B. L., Mizjurin S. R. *Nakopiteli jenergii* (Energy storages). Moscow: Energiia Publ., 1991, 400 p.

5. Noskov V. N., Pustovetov M. Yur., Chirkov V. K. Energy intensity of energy storage for stationary placement of traction substations [Ob jenergoemkosti nakopitelej jenergii dlja stacionarnogo razmeshhenija na tjagovyh podstancijah]. *Izvestiia RGUPS – The News of RGUPS*, 2008, no. 1, pp. 120 – 127.

6. Bunday B. D. *Metody optimizatsii. Vvodnyi kurs* (Optimization techniques. Introductory Course). Moscow: Radio i svjaz' Publ., 1984, 128 p.

7. Rozanov Yur. K., Akimov E. G. *Jelektricheskie i jelektronnye apparaty* (Electrical and electronic equipment). Moscow: Akademiia Publ., 2010, 320 p.

УДК 62-83: 621.311.001: 629.423.32

М. Ю. Пустоветов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫВОДОМ В СРЕДНЕЙ ТОЧКЕ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

*Однофазный трансформатор с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки является весьма распространенным элементом в составе различных электрических схем, в том числе на борту электроподвижного состава. Типовым случаем является питание от такого трансформатора двухполупериодной нулевой схемы выпрямления. Целью работы является подробное описание разработанной автором компьютерной модели упомянутого трансформатора, построенной на основе сочетания схемотехнического и операционного принципов составления. Предложенная модель может быть использована также для анализа процессов в однофазном двухобмоточном трансформаторе без отпайки с учетом возможных групп соединения I/1-6 или I/1-0. Группа соединения может быть учтена индивидуально для каждой половины вторичной обмотки при использовании отпайки. Показан пример встраивания модели трансформатора в более сложную компьютерную модель системы стабилизации тока возбуждения тяговых электродвигателей электровоза постоянного тока, в состав которой входит компьютерная модель насыщающегося дросселя, тиристорного выпрямителя, системы импульсно-фазового управления выпрямителем и замкнутой системы автоматического управления с пропорционально-интегральным регулятором тока и форсирующей нелинейностью. Полученные в ходе моделирования графики тока возбуждения в обмотке возбуждения коллекторного тягового электродвигателя и его реактивной составляющей показывают, что рассмотренная система стабилизации тока и ее компьютерная модель работоспособны и успешно выполняют возложенные на них функции: при спаде тока якоря ток возбуждения поддерживается за счет увеличения тока подпитки от выпрямителя управления возбуждением. Констатируются корректная работа и удобство использования разработанной компьютерной модели однофазного трансформатора с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки.*

Однофазный трансформатор с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки является частным случаем однофазного многообмоточного трансформатора (его компьютерная модель описана в работах [1, 2]), используемого, например, для питания однофазных двухполупериодных выпрямителей, выполненных по нулевой схеме [3, 4]. На схеме рисунка 1 показан пример применения такого трансформатора на электровозе постоянного тока для поддержания тока  $I_b$  обмоток возбуждения ОВ1 и ОВ2 током подпитки  $I_{rectif}$  от выпрямителя при пропадании напряжения в контактной сети и, как следствие, спаде  $I_a$  тока якорей Я1 и Я2 тяговых электродвигателей.

Ток  $I_{rectif}$  индуцируется приложением к первичной обмотке трансформатора Tr1 переменного напряжения  $U_1$  в форме меандра с частотой 400 Гц. Устройство в составе тиристоров VS1, VS2 и нулевого диода VD1 называется выпрямителем управления возбуждением (ВУВом). ИШ – индуктивный шунт, т. е. дроссель с ферромагнитным сердечником (его компьютерная модель описана в источниках [2, 5]).

В электровозе с коллекторными тяговыми электродвигателями (КТЭД) последовательного возбуждения актуальной задачей является стабилизация тока в обмотке возбуждения (ОВ) КТЭД при уменьшении тока якоря. Ток якоря может снижаться, например, вследствие развития процесса боксования приводимой оси электровоза. При боксовании из-за ухудшения сцепления колеса с рельсом, что тождественно снижению момента нагрузки на валу КТЭД, возрастает частота вращения якоря КТЭД, из-за этого возрастает противоЭДС КТЭД, что ведет к снижению тока в якоре. При последовательной схеме возбуждения снижение тока в якоре приводит к уменьшению тока в ОВ, что равносильно ослаблению поля КТЭД. Чтобы в описанной ситуации избежать ухода КТЭД вразнос, нужно поддерживать неизменным значение тока возбуждения, для чего предусмотрен ВУВа, осуществляющий подпитку ОВ КТЭД током при снижении тока якоря. Задача ВУВа состоит в реакции на снижение тока в ОВ. Пока ток в ОВ равен номинальному, тиристоры ВУВа находятся в запертом состоянии. При снижении тока в ОВ угол проводимости тиристоров ВУВа возрастает в некоторой функции от фактической величины тока в ОВ. В выбранной схеме выпрямителя предельным углом управления является  $\alpha_M = 180^\circ$ . Подробное описание электрической схемы питания ВУВа применительно к магистральному электровозу постоянного тока 2ЭС4К содержится в источнике [6]. Схема электровоза позволяет осуществлять подпитку ОВ, применять ослабление поля или независимое возбуждение.

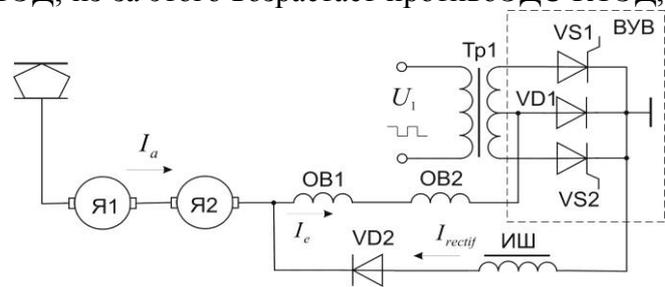


Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая использование однофазного трансформатора с отпайкой в средней точке вторичной обмотки для питания выпрямителя управления возбуждением на электровозе постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями

Рассмотрим структуру компьютерной модели однофазного трансформатора с отпайкой в средней точке вторичной обмотки. Компьютерная модель выполнена на основе сочетания схмотехнического и операционного принципов составления в среде OrCAD 9.2 в виде иерархического блока [7, 8] с внутренним содержанием, представленным на рисунках 2 – 4. Использование схмотехнического принципа позволяет в среде визуального программирования электрических и электронных схем получить возможность сопряжения между собой моделей различных устройств путем простого соединения виртуальных клемм. На рисунке 2 –  $I_{\mu \text{ ном}}$  действующее значение тока намагничивания трансформатора в номинальном режиме.

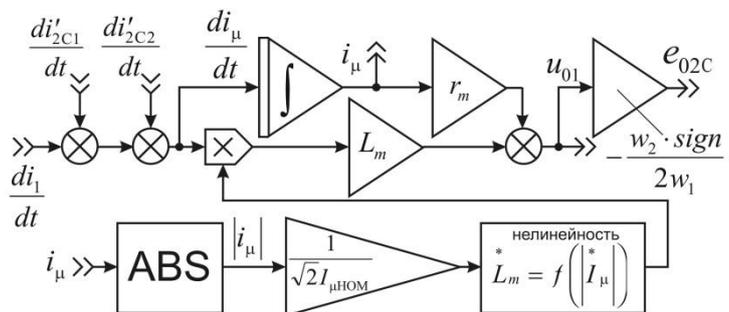
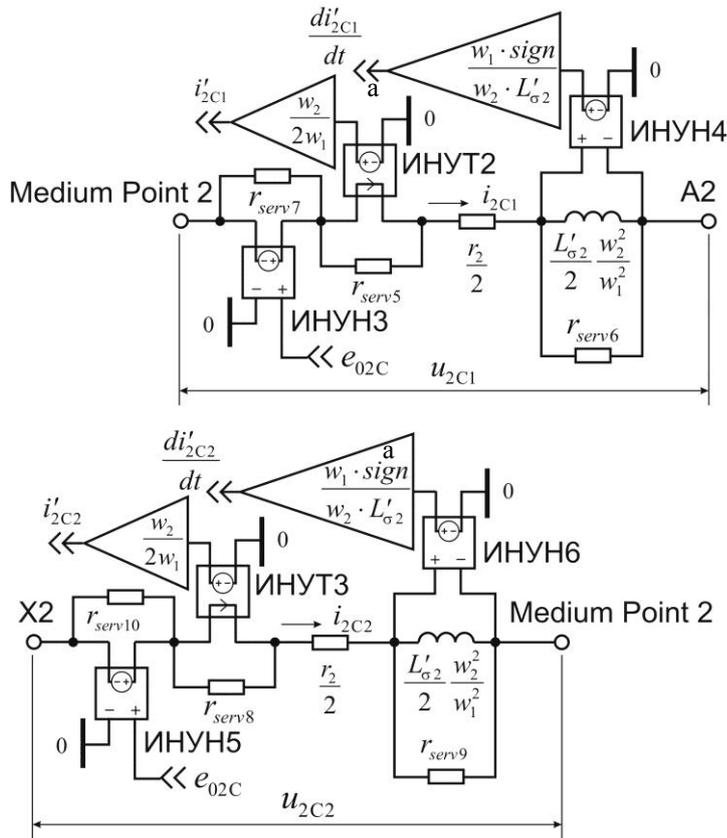


Рисунок 2 – Структурная схема для моделирования ЭДС  $e_{02C}$  и напряжения  $u_{01}$  ветви намагничивания при последовательном соединении в ней активного сопротивления  $r_m$  и индуктивности  $L_m$

На рисунках 2 и 3 коэффициент  $sign$  должен быть задан равным «1» (для получения группы соединений  $I/I - 6$ ) или «-1» (для получения группы соединений  $I/I - 0$ ). Задание нелинейности кривой намагничивания на рисунке 2 производится согласно указаниям в работах [2, 9]. На рисунках 2 – 4 индекс С обозначает принадлежность к секции вторичной обмотки;  $r_{serv}$  – активные сопротивления служебного назначения:  $r_{serv4}$  – порядка 1 мкОм или менее, остальные – порядка 1 – 10 МОм или более. По аналогии с данными, приведенными в источниках [2, 10], в качестве датчиков и для ввода сигналов в составе модели на рисунках 2 – 4 использованы элементы типа ИНУН, ИНУТ, ИТУН. В этих сокращениях: И – источник;

У – управляемый; Н – напряжение; Т – ток. Например: ИНУТ – источник напряжения, управляемый током. Другие обозначения на рисунке 2 – 4 общепринятые:  $u$  – напряжение;



б

Рисунок 3 – Модель вторичной обмотки с отпайкой в средней точке

если нагрузку включить между клеммами А2 и Х2, не используя для подключения отпайку вторичной обмотки. Выполняется равенство:

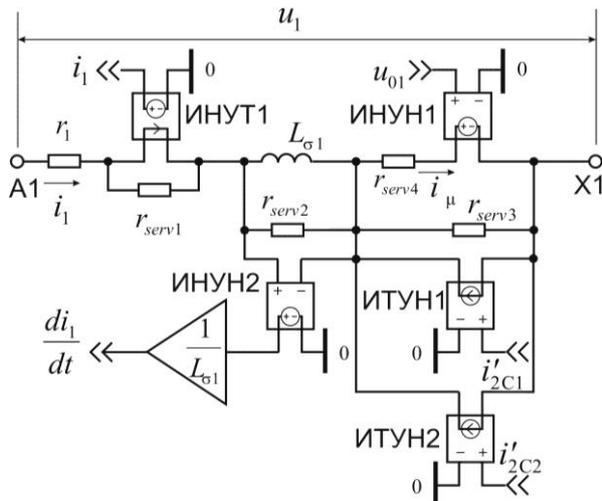


Рисунок 4 – Модель первичной обмотки

$i$  – ток;  $w$  – количество витков обмотки;  $r$  – активное сопротивление;  $L_\sigma$  – индуктивность рассеяния. Индексы 1 и 2 означают принадлежность к первичной и вторичной обмотке соответственно. Штрих в обозначении переменной или параметра с индексом 2 означает приведение их по величине к параметрам первичной обмотки. Например:  $i'_{2C1}$  – ток 1-й секции вторичной обмотки, приведенный к параметрам первичной обмотки трансформатора;  $e_{02C}$  – ЭДС ветви намагничивания для секции вторичной обмотки;  $u_{01}$  – напряжение на зажимах ветви намагничивания на первичной стороне;  $L_m$  – главная индуктивность трансформатора при последовательном соединении с ней активного сопротивления потерь в стали  $r_m$ .

Компьютерная модель на рисунках 2 – 4 универсальна в том смысле, что может быть применена и для моделирования однофазного двухобмоточного трансформатора,

$$u_2 = u_{2C1} + u_{2C2} \quad (1)$$

Рассмотренная выше компьютерная модель однофазного трансформатора с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки встроена как элемент в компьютерную модель системы стабилизации тока в ОВ КТЭД [11]. Другой элемент – компьютерная модель силовой части тиристорного выпрямителя – показан на рисунке 5.

Тиристоры моделируются упрощенно в виде идеализированных ключей, управляемых напряжением, последовательно которым включены диоды. Модели ИШ (типа ИШ 84) и ОВ КТЭД (типа ДТК800А) реализованы как компьютерные модели дросселя [2, 5] с учетом нелинейности кривых намагничивания [2, 9].

Так как автору было известно, что по результатам опытов спад тока в ОВ происходит от 570 А до 0 А за время 7,125 с, но не был известен точный характер кривой спада тока, а также с целью упрощения модели, сокращения

затрат машинного времени, проверки системы стабилизации тока в заведомо более жестких условиях было принято решение о том, что достаточно смоделировать равномерное снижение тока якоря при значительно ускоренном спаде тока (за 71,25 мс). При таком допущении якорные цепи КТЭД реализованы в модели в виде импульсного источника тока с программируемой длительностью импульса и фронтов (см. рисунок 5).

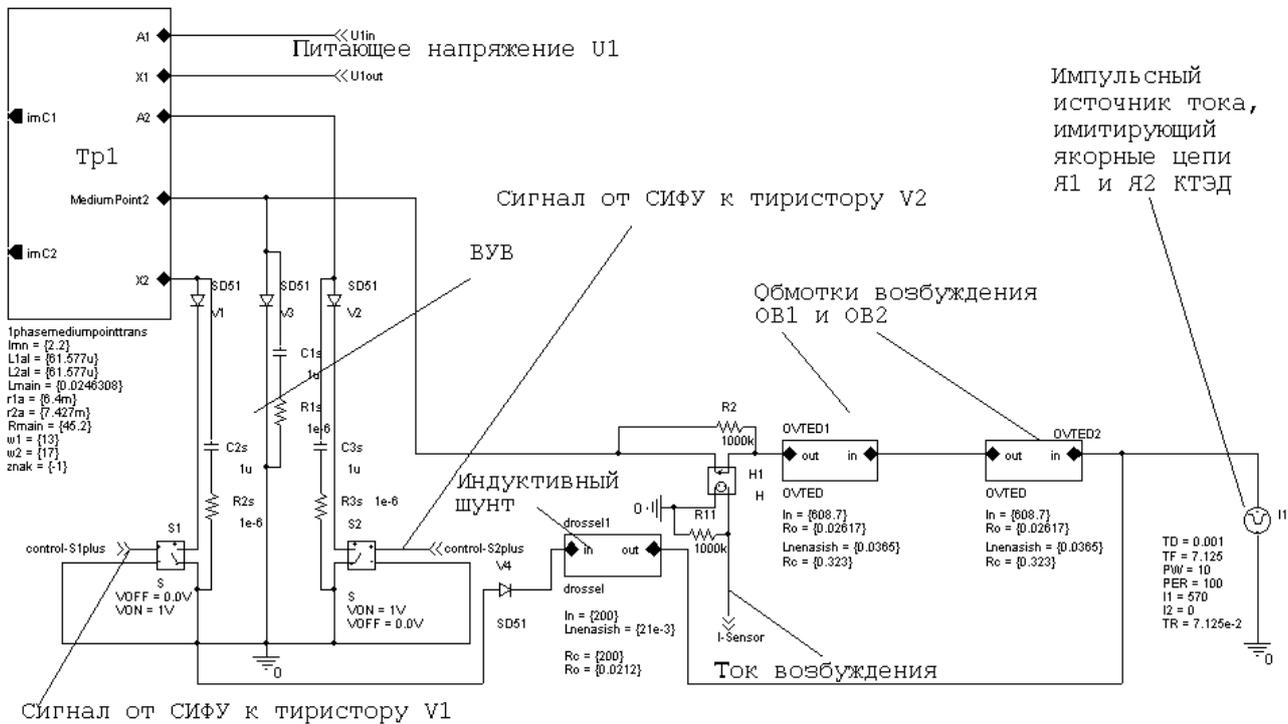


Рисунок 5 – Компьютерная модель силовой части системы стабилизации тока в ОВ КТЭД

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) выпрямителем предназначена для формирования и распределения импульсов на отпирание тиристоров ВУВа. В состав модели СИФУ входят датчик величины тока ОВ; обратная связь по току ОВ КТЭД; нелинейность, форсирующая момент открытия тиристоров уже при малых отклонениях тока возбуждения вниз от номинального и тем самым повышающая быстродействие системы стабилизации тока в ОВ; ПИ-регулятор тока (выбран из условия настройки контура тока возбуждения на технический оптимум согласно рекомендациям работы [12]), узел формирования угла  $\alpha$  отпирания тиристоров, узел, производящий распределение сигналов на тиристоры. На рисунке 6 приведена компьютерная модель СИФУ, построенная по принципу структурной схемы.

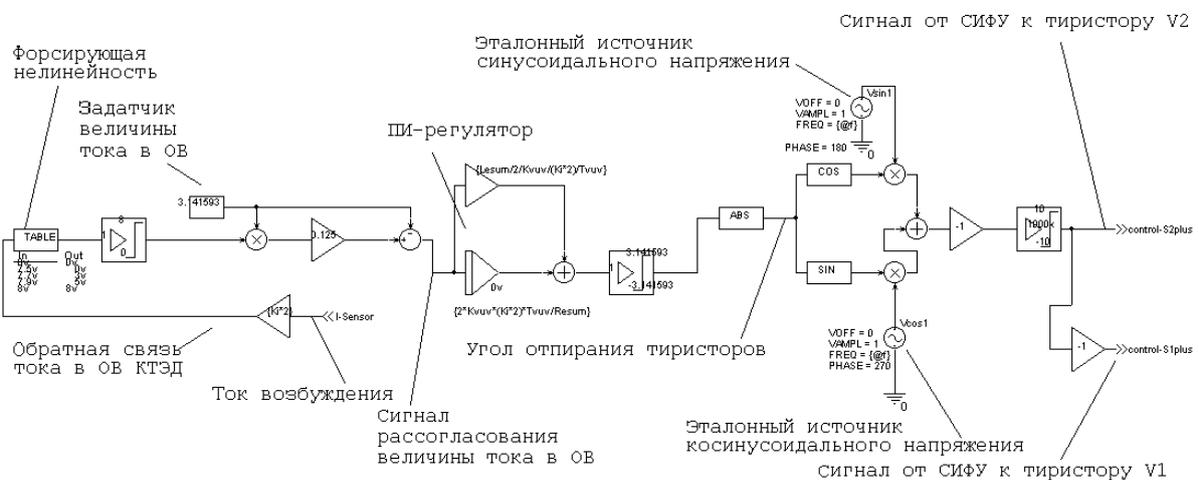


Рисунок 6 – Компьютерная модель управляющей части системы стабилизации тока в обмотке возбуждения тягового электродвигателя

В компьютерной модели СИФУ сигнал обратной связи по току возбуждения, приходящий на вход ПИ-регулятора, не может превышать значения 3,141593, для чего ранее он ограничивается в пределах (0 – 8) В. Величина напряжения в обратной связи по току возбуждения, равная 8 В, имеет место при достижении током возбуждения номинальной величины. Для повышения быстродействия системы стабилизации тока ОВ сигнал, поступающий с датчика тока возбуждения, пропускается через специфическую нелинейность, позволяющую форсировать момент открытия тиристорov уже при малых отклонениях тока возбуждения вниз от номинального. Конфигурация форсирующей нелинейности, использованная при моделировании, приведена в таблице.

Форсирующая нелинейность для обработки сигнала с датчика тока возбуждения с целью повышения быстродействия системы стабилизации тока ОВ

Напряжение на входе нелинейности, В	Напряжение на выходе нелинейности, В
0,0	0,0
7,5	0,0
7,7	3,0
7,9	5,0
8,0	8,0

Сигнал на выходе ПИ-регулятора нормируется в пределах  $-3,141593 \dots +3,141593$ . Модуль этого сигнала подается в качестве значения угла  $\alpha$  отпирания тиристорov выпрямителя для обработки в соответствии с тригонометрическим выражением

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

где в качестве угла  $\beta$  употребляется фазовый угол источника напряжения  $V_{\sin 1}$ . Для правильной настройки функционирования СИФУ нужно, чтобы фаза эталонного источника синусоидального напряжения  $V_{\sin 1}$ , по сравнению с выходным сигналом которого осуществляется сдвиг момента отпирания тиристорa, совпадала с фазой первой гармоники напряжения на входе ВУВа. В данной модели это совпадение обеспечено путем подбора. Полученный в результате обработки по выражению (2) сигнал синусоидальной формы инвертируем, усиливаем и ограничиваем, формируя меандр, который используем для управления идеализированными ключами, входящими в состав упрощенных моделей тиристорov.

Результаты компьютерного моделирования процесса стабилизации тока в ОВ КТЭД показаны на рисунке 7.

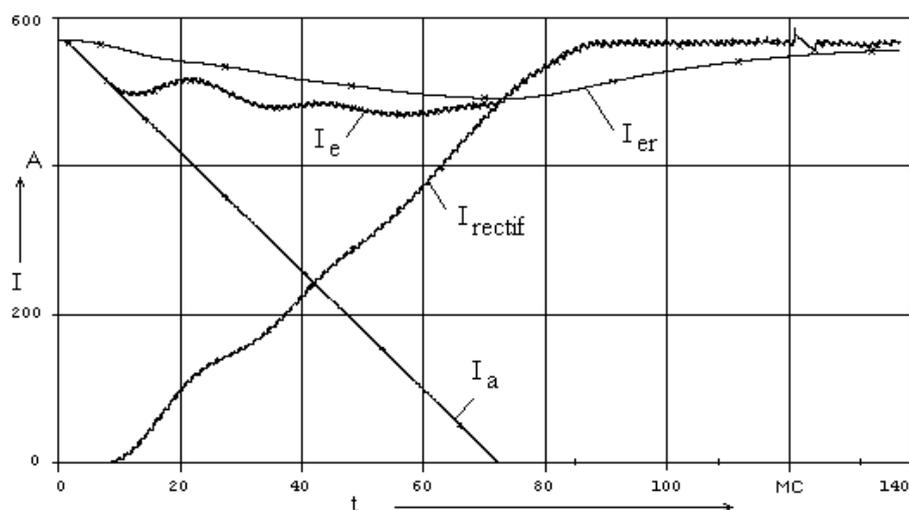


Рисунок 7 – Результаты компьютерного моделирования процесса стабилизации тока в ОВ КТЭД

Полученные в ходе моделирования графики тока возбуждения в ОВ КТЭД  $I_e$  и его реактивной составляющей  $I_{er}$  показывают, что рассмотренная система стабилизации тока и ее компьютерная модель работоспособны и успешно выполняют возложенные на них функции: при спаде тока якоря  $I_a$  ток возбуждения  $I_e$  поддерживается за счет увеличения тока подпитки от ВУВа  $I_{rectif}$ .

Следует отметить корректное функционирование и удобство использования компьютерной модели однофазного трансформатора с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки, построенной на основе сочетания схмотехнического и операционного принципов.

## Список литературы

1. Пустоветов, М. Ю. Анализ потерь тягового трансформатора при параллельной работе четырехквadrантных преобразователей [Текст] / М. Ю. Пустоветов, К. П. Солтус // Известия вузов. Электромеханика / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск. – 2009. – № 5. – С. 47 – 52.
2. Пустоветов, М. Ю. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями [Текст] / М. Ю. Пустоветов, К. П. Солтус, И. В. Синявский / LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, 2013. – 209 с.
3. Полупроводниковые выпрямители [Текст] / Е. И. Беркович, В. Н. Ковалев и др. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
4. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: Учебник [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
5. Пустоветов, М. Ю. Компьютерная модель дросселя [Текст] / М. Ю. Пустоветов, И. В. Пехотский, С. Ю. Пустоветова // Вестник ВЭЛНИИ / Всероссийский науч.-исследоват. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения. – Новочеркасск. – 2005. – Т. 1 (48). – С. 95 – 101.
6. Рутштейн, А. М. Система питания вспомогательных цепей магистрального электроваза постоянного тока от статического преобразователя [Текст] / А. М. Рутштейн // Вестник ВЭЛНИИ / Всероссийский науч.-исследоват. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения. – Новочеркасск. – 2005. – Т. 2 (49). – С. 128 – 141.
7. Разевиг, В. Д. Система проектирования цифровых устройств OrCAD [Текст] / В. Д. Разевиг. – М.: Солон-Пресс, 2000. – 160 с.
8. Кеун, Дж. Электронное моделирование в OrCAD [Текст] (+DVD) / Дж. Кеун. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 628 с.
9. Пустоветов, М. Ю. Способ учета нелинейности кривой намагничивания при переменной частоте питающего напряжения [Текст] / М. Ю. Пустоветов, И. В. Пехотский // Вестник ВЭЛНИИ / Всероссийский науч.-исследоват. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения. – Новочеркасск. – 2004. – № 1. – С. 239 – 249.
10. Пустоветов, М. Ю. Математическая и компьютерная модели асинхронного двигателя в трехфазной системе координат [Текст] / М. Ю. Пустоветов // Электричество. – 2013. – № 7 – С. 41 – 45.
11. Пустоветов, М. Ю. Применение методов моделирования для создания высокоэффективных электроприводов [Текст] / М. Ю. Пустоветов, А. В. Чубукин // Проблемы энергосбережения и технической диагностики энергетического оборудования: Тр. науч.-практ. конф. ВЦ «Вертол-Экспо» / Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 61 – 66.
12. Онищенко, Г. Б. Электрический привод: Учебник [Текст] / Г. Б. Онищенко / Российская акад. сельскохозяйственных наук. – М. 2003. – 320 с.

## References

1. Pustovetov M. Yu., Soltus K. P. Traction Transformer Losses Analysis Under Conditions of Parallel Work of Several 4QS [Analiz poter' tiagovogo transformatora pri parallel'noi rabote

chetyrekhkvadrantnykh preobrazovatelei]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika – News of higher educational institutions. Electromechanics*, 2009, no. 5, pp. 47 – 52.

2. Pustovetov M. Yu., Soltus K. P., Siniavsky I. V. *Komp'iuternoe modelirovanie asinkhronnykh dvigatelei i transformatorov. Primery vzaimodeistviia s silovymi elektronnyimi preobrazovateliami* (Computer Simulation of Induction Motors and Transformers. Examples of Interaction with Power Converters). Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 209 p.

3. Berkovich E. I., Kovalev V. N., Kovalev F. I. *Poluprovodnikovye vypriamiteli* (Semiconductor Rectifiers). Moscow: Energiia Publ., 1978, 448 p.

4. Burkov A.T. *Elektronnaia tekhnika i preobrazovately* (Electronic Equipment and Converters). Moscow: Transport Publ., 1999, 464 p.

5. Pustovetov M. Yu., Pekhotsky I. V., Pustovetova S. Yu. Computer Model of the Saturable Reactor [Komp'iuternaia model' drosselia]. *Vestnik VEINII – Herald of All-Russia Electric Locomotive Building Institution*, 2005, no. 1 (48), pp. 95 – 101.

6. Rutshtein A. M. System of Feeding of Auxiliary Circuits of Main Traction DC Electric Locomotive from Static Converter [Sistema pitaniia vspomogatel'nykh tsepei magistral'nogo elektrovoza postoiannogo toka ot staticheskogo preobrazovatelya]. *Vestnik VEINII – Herald of All-Russia Electric Locomotive Building Institution*, 2005, no. 2 (49), pp. 128 – 141.

7. Razevig V. D. *Sistema proektirovaniia tsifrovyykh ustroystv OrCAD* (OrCAD System for Design of Digital Devices). Moscow: Solon-R Publ., 2000, 160 p.

8. Keown J. *Elektronnoe modelirovanie v OrCAD* (OrCAD PSpice and Circuit Analysis). Moscow: DMK Press Publ., 2010, 628 p.

9. Pustovetov M. Yu., Pekhotsky I. V. The Method of Nonlinearity of Magnetization Curve Taking into Account at Variable Frequency of Feeding Voltage [Sposob ucheta nelineinosti krivoi namagnichivaniia pri peremennoi chastote pitaiushchego napriazheniia]. *Vestnik VEINII – Herald of All-Russia Electric Locomotive Building Institution*, 2004, no. 1, pp. 239 – 249.

10. Pustovetov M. Yu. Mathematical and Computer Models of Induction Motors at 3-phase System of Axes [Matematicheskaiia i komp'iuternaia modeli asinkhronnogo dvigatelya v trekhfaznoi sisteme koordinat]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no. 7, pp. 41 – 45.

11. Pustovetov M. Yu., Chubukin A. V. Application of Modeling Techniques to Create High Effective Electric Drives [Primenenie metodov modelirovaniia dlia sozdaniia vysokoeffektivnykh elektroprivodov]. *Problemy energosberezheniia i tekhnicheskoi diagnostiki energeticheskogo oborudovaniia: tr. nauch.-prakt. konf. VTs «Vertol-Ekspo»* (Problems of energy saving and technical diagnostics of power equipment: transactions of scientific-practical conference. Exhibition Center «Vertol-Expo»). – Rostov-on-Don, 2006, pp. 61 – 66.

12. Onishchenko G. B. *Elektricheskii privod* (Electric Drive). Moscow: RASKhN Publ., 2003. 320 p.

УДК 621.331:621.311

В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ОАО «РЖД»

Наличие постоянно меняющейся электротяговой нагрузки, распределенной не только по времени, но и в пространстве приводит к сложности детального мониторинга энергетической эффективности организации движения поездов ОАО «РЖД». Поэтому одной из первоочередных задач энергетической стратегии ОАО «РЖД» является внедрение инновационных технических средств и технологий. В работе рассмотрены основные положения и некоторые функциональные возможности создаваемого автоматизированного информационно-измерительного комплекса учета электрической энергии на электроподвижном составе.

Основным видом деятельности ОАО «Российские железные дороги» являются перевозки. Удельная энергоемкость перевозки грузов – это отношение затрат энергии (и, как следствие, расходы на ее покупку) к массе перевозимого груза с использованием этой энергии. В условиях создания конкурентных транспортных коридоров в обход России необходимо создание таких условий перевозок, основными критериями которых являются невысокая стоимость и высокая маршрутная скорость грузов. В связи с тем, что значительную долю стоимости перевозок составляют энергетические затраты, вопросы повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта имеют особую актуальность.

Для решения поставленных задач ОАО «РЖД» ведет постоянную работу в области энергосбережения, что подтверждается множеством документов, основным из которых является энергетическая стратегия ОАО «РЖД». Основной целью стратегии является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов во всех сферах деятельности ОАО «РЖД» для повышения экономической эффективности железнодорожных перевозок на основе внедрения инновационных технических средств и технологий.

Работы, проводимые в последнее время в рамках обследования системы тягового электрооборудования (СТЭ) и электроподвижного состава (ЭПС), показали, что с целью завершения формирования комплекса разработанных программ энергоменеджмента [1] необходимо выполнить ряд научно-технических разработок и внедрений.

Оценку эффективности использования электрической энергии на тягу поездов и, как следствие, повышение энергоэффективности работы СТЭ и ЭПС невозможно осуществить без основного источника информации – систем учета электрической энергии. Существующая система учета электроэнергии на тягу поездов обладает весьма ограниченной функциональностью и в настоящее время не удовлетворяет современным потребностям компании ОАО «РЖД». В связи с этим специалистами ОмГУПС ведется инновационная работа по разработке автоматизированной системы мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса (АСМЭПП), которая позволила бы решать широкий спектр задач в сфере эффективности использования электрической энергии на тягу поездов.

Основные задачи АСМЭПП.

1. Снизить «небаланс» электроэнергии в тяговой сети до уровня технологических потерь и отказаться от термина «небаланс», заменив его общеизвестным термином «технологические потери». «Коммерческая» составляющая «небаланса» практически будет ликвидирована.

2. Снизить расход электрической энергии на тягу поездов за счет учета рекомендаций суточного мониторинга участков железной дороги с необоснованно повышенным удельным расходом, заниженным значением удельной рекуперации, неиспользованием рекомендованных эффективных режимов ведения поездов установленной массы, повышения эффективности использования энергии рекуперативного торможения, применения энергосберегающего оборудования и т. д.

3. Снизить технические потери в тяговой сети за счет учета рекомендаций синхронного мониторинга уровней напряжения на шинах тяговых подстанций и токоприемниках ЭПС, применения эффективных режимов работы оборудования тяговых подстанций, обеспечения равномерного распределения питания межподстанционных зон со смежных тяговых подстанций, повышения качества электрической энергии и т. д.

4. Автоматизировать получение основных показателей о расходе электрической энергии ЭПС без внесения машинистом ручной записи в маршрутный лист машиниста.

5. Автоматизировать подготовку протоколов по энергетической эффективности поездов на участках обслуживания, по эффективности работы дистанций электроснабжения и эффективности организации движения поездов с учетом работы системы тягового электроснабжения.

В рамках создания АСМЭПП будут внедряться две основные подсистемы – автоматизированный информационно-измерительный комплекс на электроподвижном соста-

ве (АИИК ЭПС) и автоматизированная система учета электроэнергии на фидерах контактной сети (АСУЭ ФКС).

Рассмотрим некоторые особенности работы и функциональные возможности создаваемой подсистемы АИИК ЭПС.

К основным функциям этой подсистемы относятся следующие:

автоматическое измерение и запись параметров электропотребления и рекуперации ЭПС с заданным интервалом и привязкой к глобальному времени и географическим координатам;

автоматизированная идентификация машиниста с привязкой табельного номера к результатам измерений;

автоматическая передача результатов измерений на сервер.

В результате функционирования этой подсистемы на борту ЭПС в памяти контроллера формируется база данных фиксируемых параметров. Минимальный набор параметров представлен в таблице 1.

Передача информации с АИИК ЭПС на основной сервер АСМЭПП, расположенный в ГВЦ ОАО «РЖД», осуществляется с использованием технологической ремонтно-оперативной радиосвязи ОАО «РЖД» (РОРС) на базе подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM в режиме GPRS.

На сервере осуществляется привязка измеренных АИИК ЭПС параметров к зонам учета электроэнергии по методу соотнесения результатов измерений количества электрической энергии (мощности) с навигационными и информационными сведениями, изложенному в «Методике измерения электроэнергии (мощности) на тяговом подвижном составе», утвержденной распоряжением президента ОАО «РЖД» №2339р от 16 ноября 2010 г. В соответствии с данным методом измеренные географические координаты местоположения ЭПС сопоставляются с географическими координатами границ зон учета электроэнергии. База данных географических координат границ зон учета электроэнергии должна храниться на сервере баз данных в ГВЦ ОАО «РЖД».

Таблица 1 – Минимальный перечень фиксируемых параметров

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Формат регистрации данных и единицы измерения параметров
<b>Программируемые</b>			
1	Серия электровоза	<i>C</i>	В соответствии с базой данных серий электровозов
2	Номер электровоза	<i>N</i>	В соответствии с базой данных номеров электровозов
<b>Измеряемые</b>			
1	Дата и время	<i>t</i>	ддммгг ччммсс
2	Географическая широта	$\varphi$	ГГММмммм
3	Географическая долгота	$\lambda$	ГГММмммм
4	Расход электроэнергии, потребленной из контактной сети	<i>W</i>	кВт·ч
5	Возврат (рекуперация) электроэнергии	$W^R$	кВт·ч
6	Расход электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов	$W^B$	кВт·ч
<b>Импортируемые</b>			
1	Табельный номер машиниста	<i>M</i>	В соответствии с базой данных машинистов
2	Код состояния локомотива	<i>K</i>	В соответствии с базой данных кодов состояний локомотива

В качестве зон учета электроэнергии принимаются следующие: межподстанционные зоны, дистанции электроснабжения, полигоны железных дорог, тарифные зоны, поездоучастки, пути отстоя, участки работы локомотивных бригад.

В результате обработки данных формируется итоговая форма в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Форма представления данных после соотнесения результатов измерения с границами зон учета для конкретного ЭПС

Се- рия ЭПС	Но- мер ЭПС	Дата и время			Электроэнергия			Табель- ный номер маши- ниста	Код состоя- ния локомо- тива	Коды зон учета электроэнергии							
		<i>t</i>	$\varphi$	$\lambda$	рас- ход, <i>W</i>	реку- пера- ция, $W^R$	отоп- ление ваго- нов $W^B$			ЛБ	МПЗ	ЭЧ	ЖД	ТЗ	ПУ	ПО	
																	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
С	N	$t_0$	$\varphi_0$	$\lambda_0$	$W_0$	$W_0^R$	$W_0^B$	$M_1$	$K_1$	$L_1$	$Z_1$	$E_1$	$J_1$	$T_1$	$P_1$		
		$t_1$	$\varphi_1$	$\lambda_1$	$W_1$	$W_1^R$	$W_1^B$			$L_1$	$Z_1$	$E_1$	$J_1$	$T_1$	$P_1$		
		$t_2$	$\varphi_2$	$\lambda_2$	$W_2$	$W_2^R$	$W_2^B$			$L_1$	$Z_2$	$E_1$	$J_1$	$T_1$	$P_2$		
		$t_3$	$\varphi_3$	$\lambda_3$	$W_3$	$W_3^R$	$W_3^B$	$M_1$	$K_3$	$L_1$	$Z_2$	$E_1$	$J_1$	$T_1$	$P_2$		
		$t_4$	$\varphi_4$	$\lambda_4$	$W_4$	$W_4^R$	$W_4^B$			$L_1$	$Z_2$	$E_1$	$J_1$	$T_2$	$P_2$		
		$t_5$	$\varphi_5$	$\lambda_5$	$W_5$	$W_5^R$	$W_5^B$			$L_1$	$Z_2$	$E_1$	$J_1$	$T_2$	$P_3$		
		$t_6$	$\varphi_6$	$\lambda_6$	$W_6$	$W_6^R$	$W_6^B$			$L_1$	$Z_2$	$E_1$	$J_1$	$T_2$	$P_3$		
		$t_7$	$\varphi_7$	$\lambda_7$	$W_7$	$W_7^R$	$W_7^B$			$L_1$	$Z_3$	$E_2$	$J_1$	$T_2$	$P_4$		
		$t_8$	$\varphi_8$	$\lambda_8$	$W_8$	$W_8^R$	$W_8^B$	$M_1$	$K_3$	$L_1$	$Z_3$	$E_2$	$J_1$	$T_3$	$P_4$		
		$t_9$	$\varphi_9$	$\lambda_9$	$W_9$	$W_9^R$	$W_9^B$				$Z_3$	$E_2$	$J_1$	$T_3$	$P_4$		
		$t_{10}$	$\varphi_{10}$	$\lambda_{10}$	$W_{10}$	$W_{10}^R$	$W_{10}^B$	$M_2$	$K_1$	$L_2$	$Z_3$	$E_2$	$J_1$	$T_3$	$P_4$		
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
		$t_i$	$\varphi_i$	$\lambda_i$	$W_i$	$W_i^R$	$W_i^B$	$M_m$	$K_x$	$L_m$	$Z_z$	$E_n$	$J_g$	$T_t$	$P_p$	$O_o$	

В таблице 2 обозначено: ЛБ – участок работы локомотивной бригады; МПЗ – межподстанционная зона; ЭЧ – дистанция электроснабжения; ЖД – полигон железной дороги; ТЗ – тарифная зона; ПУ – поездоучасток; ПО – пути отстоя.

Алгоритм определения расхода и возврата (рекуперации) электроэнергии ЭПС в границах зон учета ОАО «РЖД» заключается в следующем.

Расход электроэнергии ЭПС в границах любой зоны учета за отчетный период определяется по формуле:

$$W_{3y} = \sum_{s=1}^f \sum_{i=1}^q (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (1)$$

где  $(W_{is} - W_{(i-1)s})$  – измеренное значение приращения количества электроэнергии, потребленной ЭПС из контактной сети, за отчетный период (столбец 6 табл. 2);

$f$  – количество ЭПС, обращавшихся в расчетной зоне учета в отчетном периоде;

$q$  – количество интервалов измерения электроэнергии за время нахождения ЭПС в границах расчетной зоны учета в отчетном периоде.

Аналогично формуле (1) определяются значения рекуперации ( $W_{3y}^R$ ) и расхода электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов ( $W_{3y}^B$ ) в границах расчетной зоны учета за отчетный период.

Для определения удельных показателей работы ЭПС в границах расчетной зоны учета применяется следующий алгоритм.

Сначала должна быть сформирована таблица соответствия даты, номера поезда, номера машиниста и электровоза и основного показателя поезда – веса. Данное соответствие осуществляется путем импортирования данных из системы централизованной обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Импортированные данные из ЦОММа для определения удельных показателей работы ЭПС в заданной зоне учета

Дата и время приемки ЭПС	Дата и время сдачи ЭПС	Номер маши- ниста	Номер ЭПС	Номер поезда	Вес поезда
$t_{n1}$	$t_{c1}$	$M_1$	$N_1$	$P_1$	$m_1$
...	...	...	...	...	...
$t_{ni}$	$t_{ci}$	$M_m$	$N_n$	$P_k$	$m_s$

Для определения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов при проследовании поезда  $P_1$  по межподстанционной зоне  $Z_2$  под управлением машиниста с номером  $M_3$  на локомотиве  $N_4$  необходимо в таблице 2, составленной для локомотива  $N_4$ , просуммировать измеренные значения приращения количества электроэнергии, потребленной этим ЭПС из контактной сети, за отчетный период при проследовании поезда  $P_1$  по межподстанционной зоне  $Z_2$  под управлением машиниста с номером  $M_3$ :

$$W_{3_2}^{M_3} = \sum_{i=1}^q (W_{is} - W_{(i-1)s}), \text{ если } \begin{cases} t_{\text{п}} < t_i < t_{\text{с}}; \\ M_m = M_3; \\ Z_z = Z_2. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда удельный расход электрической энергии на тягу поездов при проследовании поезда  $P_1$  по межподстанционной зоне  $Z_2$  под управлением машиниста с номером  $M_3$  на локомотиве  $N_4$  определяется по уравнению:

$$a_{3_2}^{M_3} = 10000 \frac{W_{3_2}^{M_3}}{m_1 \cdot l_{3_2}}, \quad (3)$$

где  $m_1$  – вес поезда  $P_1$ , т;

$l_{3_2}$  – длина межподстанционной зоны  $Z_2$ , км.

Аналогично определяется удельный расход электроэнергии в границах произвольной зоны учета для любой единицы ЭПС или локомотивной бригады (по номеру машиниста). По результатам вычислений составляются протоколы выполнения заданных норм удельного расхода электроэнергии и рекуперации в границах нормируемых зон учета, что позволяет оценить эффективность работы ЭПС или локомотивной бригады в этих границах.

Помимо удельного расхода и рекуперации электрической энергии в функциональные возможности системы входит выполнение расчетов и автоматизированное составление следующих протоколов по оценке энергетической эффективности организации движения поездов в границах любых зон учета:

- расхода электроэнергии в режиме простоя в пути следования и в ожидании работы;
- расхода электрической энергии на неграфиковые остановки;
- расхода электрической энергии у запрещающих сигналов;
- расхода электрической энергии на путях отстоя в ожидании ремонта, модернизации или ТО;
- технической и участковой скорости;
- расхода электрической энергии при нагоне пассажирского поезда;
- расхода электрической энергии при ограничении технической скорости;
- расхода электрической энергии на торможение, трогание с места и разгон до установленной скорости при неграфиковых остановках;
- неэффективного использования мощности электровозов при вождении неполновесных и неполносоставных поездов.

Анализ этих протоколов позволит выявлять места и случаи неэффективного использования электрической энергии и принимать управляющие воздействия (организационно-технические мероприятия, ремонт, внедрение новых технологий и др.) по повышению энергетической эффективности организации движения поездов.

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

1. Cheremisin V. T. Nikiforov M. M. Evaluation of potential energy efficiency of electric traction system [Otsenka potentsiala povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2013, no. 2 (14), pp. 75 – 84.

## АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ДОСТУПА БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ WI-FI, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*В статье авторы проводят анализ информационной безопасности современной технологии беспроводного взаимодействия компьютерных сетей Wi-Fi. Проведен анализ международных провайдеров и статистики нарушений для нескольких основных стандартов безопасности и сделаны выводы по безопасности сетей Wi-Fi. Даны основные рекомендации развертывания Wi-Fi-сетей для объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.*

Исследование беспроводных коммуникаций включало в себя анализ характеристик Wi-Fi сетей. В ходе исследования собиралась лишь информация по параметрам беспроводных устройств, доступных любому участнику беспроводного взаимодействия. Рассматривались домашние сети, беспроводные сети различных организаций, а также точки доступа, размещенные в различных общественных местах, таких как вокзалы, аэропорты, гипермаркеты и т. д. Сбор или дешифрование данных, передаваемых по беспроводным сетям, не проводились по причине законодательных ограничений. Отчет не содержит данных о фактическом местоположении или точных именах обнаруженных сетей.

Важность данного анализа вызвана стремительным распространением беспроводных технологий. В частности, ОАО «Российские железные дороги» в поездах дальнего следования в скором времени обещают массово запустить беспроводной доступ в сеть Интернет по технологии Wi-Fi, которая уже успешно применяется на крупных железнодорожных станциях в зданиях вокзала. Необходимость подобных исследований, связанных с мониторингом информационной безопасности, выявлением «узких мест» основных стандартов связи и определением наиболее распространенных настроек межсетевого взаимодействия и коммутируемого доступа, обеспечивающих конфиденциальность, целостность и доступность передаваемых данных, возникает ежегодно [1], так как со стороны множества пользователей, компаний и университетов, обеспечивающих необходимый уровень информационной безопасности, создаются новые методы и средства для усиления защиты передаваемых данных, а со стороны субъектов, заинтересованных в получении закрытой информации, происходит увеличение риска взлома предложенных «защитниками» методов и средств, что обусловлено ростом вычислительных возможностей аппаратных и программных средств.

Различными организациями, специализирующимися на анализе информационной безопасности, в разное время в нескольких странах мира были проведены исследования беспроводных Wi-Fi-сетей. Основной целью исследований было выявление количества сетей, использующих определенные методы защиты (OPEN, WEP, WPA, WPA2).

Исследования, опубликованные Information Commissioner's Office (ICO) 11 марта 2011 г., показывают, что 40 % пользователей домашних Wi-Fi-сетей не знает, как изменять настройки безопасности своей сети. Интернет-опрос показал, что 16 % процентов пользователей используют открытые сети. Исследователи информационной безопасности отмечают, что около половины пользователей домашних Wi-Fi-сетей никогда не меняли изначально установленный пароль.

Экспертами «Лаборатории Касперского» неоднократно проводились подобные исследования в различных городах Европы и Южной Америки. В ходе этих исследований были получены сведения о скорости передачи данных в различных беспроводных сетях, производителях используемого сетевого оборудования, используемых каналах для обмена информацией и шифрования трафика. Последний пункт рассмотрим более подробно.

Параметры безопасности в различных городах и странах значительно отличаются друг от друга. Начнем с результатов, полученных экспертами «Лаборатории Касперского» в 2006 г.

Количество беспроводных сетей в Пекине, не использующих шифрование, было около 60 %, в то время как в Париже этот показатель равнялся 29 % от общего количества беспроводных сетей.

В 2007 г. в Лондоне процент беспроводных сетей, использующих какой-либо вид шифрования, составлял 69 %. В то же время в Варшаве количество сетей, использовавших алгоритм обеспечения безопасности WEP, составляло 58 %, остальные 42 % были открытыми. Более подробный отчет за этот же период был получен из Каракаса, столицы Венесуэлы. Процент Wi-Fi-сетей, не использовавших какой-либо вид шифрования, равен 46 %, использующих WEP – 30 %, WPA – 21, WPA2 – 3 %.

С течением времени вопрос безопасности беспроводных сетей становится все актуальнее.

Для 2008 г. показатели информационной безопасности для мексиканского города Монтеррей следующие: количество сетей, не использующих шифрование, 35 % от общего числа Wi-Fi-сетей, использующих WEP – 58 %, WPA – 6, WPA2 – 1 %. В бразильском Сан-Паулу параметры безопасности оказались несколько лучше: открытые сети – 24 %, WEP – 50, WPA – 22, WPA2 – 4 %. Схожие результаты были получены в чилийском Сантьяго: открытые сети – 16 %, WEP – 61, WPA – 23 %. Отчет из Копенгагена показывает соотношение беспроводных сетей, использующих легко уязвимый алгоритм обеспечения безопасности WEP – 23 % и более надежный механизм защиты WPA – 77 %.

Проанализировав отчеты экспертов «Лаборатории Касперского», можно сделать вывод о том, что происходит постепенное улучшение ситуации с шифрованием трафика в беспроводных сетях.

Компания AirTight Networks, являющаяся мировым лидером в области решений безопасности Wi-Fi-сетей, регулярно проводит обзоры, касающиеся вопросов безопасности в беспроводных сетях. В своем отчете специалисты AirTight Networks отображают основные результаты исследований информационной безопасности Wi-Fi-сетей.

В 2009 г. для нескольких крупнейших городов США сложилась следующая ситуация с использованием методов шифрования трафика: открытые сети – 24 %, WEP – 33, WPA – 32, WPA2 – 11 %.

Актуальность исследования, проводимого авторами статьи, обусловлена устаревшими сведениями, отсутствием исследований беспроводных Wi-Fi-сетей в городах России и необходимостью определить количество точек доступа, использующих стандарт WPS [2].

В ходе исследования было обнаружено 2050 беспроводных сетей. Соотношение используемых способов шифрования в беспроводных коммуникациях представлено в таблице.

Использование в сетях средств защиты информации

Тип шифрования	OPEN	WEP	WPA	WPA2
Количество беспроводных сетей	170	87	238	1555

Статистика Wi-Fi-сетей

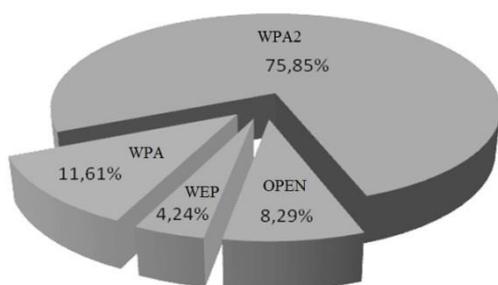


Рисунок 1 – Статистика сетей стандарта IEEE

Процентное отношение использования в сетях различных средств защиты информации представлено на рисунке 1.

Процентное отношение точек доступа, использующих стандарт WPS, от общего количества обнаруженных точек доступа представлено на рисунке 2.

При проведении исследования было обнаружено 2050 беспроводных сетей, из которых 8,3 % являются открытыми точками доступа и при

передаче данных не осуществляют шифрование трафика. Меньше всего используется WEP-шифрование, чуть более 4,2 %, WPA – 11,6 %. Самым распространенным алгоритмом шифрования является WPA2 – 75,9 %. Количество точек доступа, использующих стандарт WPS, составляет 31 % от общего количества обнаруженных точек доступа.

Результаты проведенного исследования отражают основные тенденции в использовании параметров безопасности взаимодействия беспроводных компьютерных интерфейсов. По сравнению с результатами прошлых лет налицо заметное сокращение использования стандарта Wired Equivalent Privacy (WEP), поскольку данный режим обеспечения безопасности является самым уязвимым для атак злоумышленников и даже использование максимально длинного ключа в 104 бита не гарантирует должного уровня конфиденциальности, целостности и защиты передаваемых данных [6], а также существует достаточно большой выбор программного обеспечения, не требующего специальных аппаратных возможностей для реализации различного рода атак на данный стандарт связи.

Процентное отношение сетей, не использующих какой-либо вид шифрования (открытых сетей), постепенно снижается, но в количественном отношении остается достаточно большим. Значительно сокращается число таких точек доступа среди частных организаций и домашних сетей, но во многих общественных местах, таких как автовокзалы, железнодорожные вокзалы, аэропорты, гипермаркеты, санатории и профилактории, общественный транспорт, кафе, число открытых сетей за последние несколько лет значительно увеличилось. Это обуславливается прежде всего простотой подключения бесплатного доступа к сети Интернет и взаимным использованием каких-либо общих ресурсов. При этом данный способ связи имеет значительные уязвимости, самой главной из которых является открытый, доступный для любого прослушающего устройства (анализатора) трафик.

Таким образом, подключаясь к открытым сетям, особенно в общественных местах, необходимо понимать, что передаваемые данные могут быть очень легко перехвачены и затем использованы злоумышленниками в своих целях. Злоумышленники могут намеренно создавать точки доступа со свободным подключением и доступом к сети Интернет, перехватывая таким образом данные (например, имя пользователя и пароль) для доступа к различным ресурсам (электронная почта, страницы социальных сетей, электронные счета, номера кредитных карт и т. д.).

Значительно возрастает количество беспроводных сетей, поддерживающих стандарт защищенного доступа (WPA/WPA2). Самым слабым местом в данном режиме соединения может быть несложный пароль. Чаще всего пароли принимают в виде восьмизначных цифр либо в виде словарных слов. С учетом современных аппаратных и программных вычислительных возможностей и технологии распараллеливания вычислений можно утверждать, что реализация атак прямым перебором (или атак по словарю) для «слабых» паролей является выполнимой задачей в приемлемое для злоумышленников время [4].

Алгоритм нападения в общем случае выглядит следующим образом. Для начала с помощью сетевого анализатора выбирается потенциально уязвимый клиент, подключенный к сети. Затем с помощью специального программного обеспечения злоумышленником посылаются поддельные кадры разрыва соединения к точке доступа с адресом отправителя жертвы. На следующем этапе атакующий прослушивает эфир и перехватывает пакеты

## Статистика Wi-Fi сетей с функцией WPS



Рисунок 2 – Статистика сетей с функцией WPS

установления соединения, из которых существует возможность восстановить исходный пароль. Эффективность данного метода взлома существенно ограничена криптостойкостью используемого пароля.

Особенно актуальным в данном исследовании является количественное отношение точек доступа, использующих режим защищенной настройки беспроводных сетей (WPS), к общему количеству рассмотренных сетей, так как в 2011 г. исследователь безопасности С. Вибок обнаружил уязвимость в стандарте Wi-Fi Protected Setup (WPS), которая сокращает количество попыток, необходимых для взлома PIN-кода. В силу структуры PIN-кода и особенностей работы алгоритма аутентификации данного стандарта это количество равняется 11000, хотя ранее предполагалось, что число таких попыток должно быть не менее 100000000. Примерное время взлома PIN-кода может быть получено с помощью методов имитационного моделирования [8]. Формула для расчета времени полного перебора имеет следующий вид [9]:

$$T_{\text{перебора}} = (A^4 + A^3) * (\overline{T_{\text{аут}} [0,5...3]} + T_{\text{блок.ср}}), \quad (1)$$

где  $A$  – размер алфавита, на котором записан ключ;  $T_{\text{аут}}$  – время, затрачиваемое на проверку одного пароля;  $T_{\text{блок.ср}}$  – среднее время блокировки:

$$T_{\text{блок.ср}} = \frac{T_{\text{блок}}}{N_{\text{попыт}}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{попыт}}$  – количество попыток аутентификации до блокировки;  $T_{\text{блок}}$  – время блокировки.

Таким образом, секретный код точки доступа, которая использует данный режим установления соединения без дополнительных средств защиты, может быть получен примерно за четыре часа. Требования WSC 2.0, которые обязывают выполнять блокировку аутентификации на 60 с после трех неудачных попыток аутентификации, увеличивают общее время подбора PIN-кода до 65 ч, что не обеспечивает должного уровня безопасности работы беспроводной сети по данному стандарту.

Итак, почти треть беспроводных сетей использует механизм защищенной настройки Wi-Fi-сетей, что означает их потенциальную уязвимость для злоумышленников.

Исходя из изложенных выше результатов проведенного исследования, при формировании беспроводных Wi-Fi-сетей для объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, можно реализовать определенную стратегию защиты передаваемых по беспроводным каналам связи данных. Например, для поездов дальнего следования можно сформировать два вида доступа к сети Интернет. Первый вариант – развернуть открытую (бесплатную/условно платную) сеть, но при этом необходимо довести до сведения пользователей информацию о том, что передаваемый трафик может быть легко перехвачен и использован другими пользователями в своих целях. Во втором случае для каждого отдельного пользователя можно реализовать защищенный канал передачи данных на основе выдаваемого ему пароля (за определенную плату).

Стремительное развитие беспроводных технологий охватывает практически все сферы нашей деятельности. За счет своего удобства и простоты развертывания технологии Wi-Fi уже заняли свою нишу. Сегодня с беспроводными сетями можно столкнуться как дома, в кафе, на предприятии, в малых и средних организациях, так и в общественных местах, таких как автовокзалы и железнодорожные вокзалы. С учетом стремительного роста количества беспроводных сетей и абонентов и их широкого распространения в настоящее время актуальна проблема усиления защиты всех перечисленных выше стандартов взаимодействия по беспроводным компьютерным интерфейсам. Особенно это касается режима WPS, т. е. увеличения трудоемкости вскрытия PIN-кода, поскольку, как показывают проведенные авторами исследования, около 30 % точек доступа от общего количества обнаруженных точек доступа используют потенциально уязвимый стандарт защищенной настройки беспроводных сетей.

## Список литературы

1. Морозов, А. В. Анализ атак на беспроводные компьютерные интерфейсы [Текст] / А. В. Морозов, В. Г. Шахов // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2012. – № 3 (113). – С. 323 – 327.
2. Морозов, А. В. Анализ алгоритмов безопасности беспроводных компьютерных интерфейсов [Текст] / А. В. Морозов, В. Г. Шахов / Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Тенденции развития естественных и математических наук» / НП «Сибирская ассоциация консультантов». – Новосибирск, 2013. – С. 60 – 65.
3. Морозов, А. В. Анализ атак на беспроводные локальные сети [Текст] / А. В. Морозов, В. Г. Шахов // Труды международной конференции «Динамика систем, механизмов и машин» / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – С. 263 – 266.
4. Морозов, А. В. Исследование скорости перебора паролей для режима разделяемого ключа wpa2-psk на различном аппаратном обеспечении [Текст] / А. В. Морозов, В. Г. Шахов / Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта: Материалы всерос. науч.-техн. интернет-конференции с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 141 – 147.
5. Майстренко, В. А. Безопасность информационных систем и технологий: Монография [Текст] / В. А. Майстренко, В. Г. Шахов / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2006. – 232 с.

## References

1. Morozov A. V., Shahov V. G. Analysis of attacks on wireless computer interfaces [Analiz atak na besprovodnye komp'yuternye interfeisy.] // *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Gazette*, 2012, no. 3 (113), pp. 323 – 327.
2. Morozov A. V., Shahov V. G. Analysis of the safety of wireless computer interfaces [Analiz algoritmov bezopasnosti besprovodnykh komp'yuternykh interfeisov]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Tendentsii razvitiia estestvennykh i matematicheskikh nauk»* (Abstracts of the Int. conference «Trends in the development of natural and mathematical sciences»). Novosibirsk, 2013, pp. 60 – 65.
3. Morozov A. V., Shahov V. G. Analysis of attacks on wireless LANs [Analiz atak na besprovodnye lokal'nye seti]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin»* (Abstracts of the Int. conference «Dynamics of systems, tools and machines»). Omsk, 2012, pp. 263 – 266.
4. Morozov A. V., Shahov V. G. The rate of brute force mode shared key wpa2-psk on a variety of hardware [Issledovanie skorosti perebora parolei dlia rezhima razdeliaemogo kliucha wpa2-psk na razlichnom apparatnom obespechenii]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferentsii «Nadezhnost' funktsionirovaniia i informatsionnaia bezopasnosti telekommunikatsionnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta»* (Abstracts of the Int. conference «Reliable operation and information security telecommunications rail transport systems»). Omsk, 2013, pp. 141 – 147.
5. Maystrenko V. A., Shahov V. G. *Bezopasnost' informatsionnykh sistem i tekhnologii* (Security of information systems and technologies). Omsk: OSTU Publ., 2006, 232 p.

УДК 656.222.3

А. А. Белов, А. Н. Ларин

## МОДЕЛЬ ГРУППИРОВКИ ОБЪЕКТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*В статье решается задача оптимального подбора объектов подвижного состава внутри групп по критерию минимума суммы квадратов отклонений текущих значений заданного показателя от оценки его математического ожидания для объектов группы. Решение задачи получено на основе методов, базирующихся на идеях целочисленного программирования, использующих булевы переменные и понятия тесноты связи между объектами и между группами объектов.*

Детальное изучение процесса доставки грузов железнодорожным транспортом позволяет выделить его наиболее затратные элементы, интенсификация которых позволит обеспечить достижение поставленной цели. Одним из перспективных для исследования является процесс формирования на станциях многогруппных составов. Указанному вопросу посвящено достаточно большое число публикаций [2, 3, 5], что свидетельствует о его актуальности. Для эффективного решения проблемы ускорения маневровой работы с многогруппными составами были разработаны различные методы, применение которых позволяет существенно снизить расход времени и ресурсов на формирование указанных составов. Наибольшее распространение на железных дорогах получил комбинаторный метод [5], который дает возможность на ограниченном числе путей эффективно формировать составы с произвольным числом групп. В статье [2] был предложен распределительный метод, который позволяет сформировать состав за меньшее число этапов, однако он требует осуществлять сборку вагонов со всех путей после каждой их сортировки.

Однако, как показывает анализ [2, 3], на всех сортировочных станциях сети железных дорог составы сборных поездов и грузовых подач формируются с небольшим числом групп (не более пяти – семи групп в составе поезда) с включением в эти группы вагонов без их подборки на ряд станций или грузовых фронтов. В результате средняя продолжительность стоянки сборного поезда на промежуточных станциях остается высокой и объясняется тем, что не производится детальная подборка вагонов внутри групп. Поэтому на промежуточных станциях выполняется повторная сортировка вагонов в порядке их расстановки на грузовых фронтах или в порядке передачи их на соседние промежуточные станции. Эта повторная сортировка выполняется в условиях ограниченного путевого развития, а в ряде случаев (при отсутствии изолированных вытяжек) и с занятием главных путей, что приводит к дополнительному снижению пропускной способности участка, а также к привлечению к этой работе маневровых локомотивов промежуточных станций.

Детальная подборка вагонов внутри групп должна учитывать такие факторы, как начальный и конечный пункты маршрута, инфраструктура железнодорожной сети между данными пунктами, ее загруженность и многие другие. Предположим, что совокупность этих факторов для конкретного вагона выражена в виде безразмерного показателя  $q$ . Тогда задача распределения железнодорожных вагонов по группам заключается в группировке  $n$  объектов  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ , характеризующихся соответственно значением показателя  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , в  $M$  непересекающихся групп ( $M \leq n$ ) [6].

Расположим объекты в порядке возрастания, т. е. в ряд

$$\Omega_1 \leq \Omega_2 \leq \dots \leq \Omega_n (q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_n). \quad (1)$$

Обозначим через  $G_j$  группу, в которой объект  $\Omega_j$  характеризуется наименьшим по величине значением показателя  $q$ . Назовем объект  $\Omega_j$  «ведущим» для группы  $G$ . Введем целочисленные переменные  $x_{i,j}$  так, что

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Omega_i \in G_j; \\ 0, & \text{если } \Omega_i \notin G_j. \end{cases} \quad (2)$$

Группировку целесообразно осуществлять по критерию  $W$ , суть которого состоит в минимизации суммы квадратов отклонений текущих значений показателя  $q$  от их оценки математического ожидания  $M(q)$  для объектов  $j$ -й группы:

$$\begin{cases} W_j = \sum_{i=1}^n x_{i,j} \cdot (q_i - M(q)_j)^2; \\ M(q)_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,j} \cdot q_i}{n_j}; \\ W = \sum_j W_j \rightarrow \min, \end{cases} \quad (3)$$

где  $n_j$  – количество объектов, вошедших в  $j$ -ю группу,

$$n_{i,j} = \sum_{i=1}^n x_{i,j}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (4)$$

Необходимым условием для достижения минимума функционала (3) является выполнение требования, заключающегося в том, что каждая колонка матрицы  $x$  должна содержать непрерывный ряд элементов, расположенных ниже главной диагонали, и удовлетворять условиям:

$$x_{j,j} \geq x_{j+1,j} \geq x_{j+2,j} \geq \dots \geq x_{n,j}, \quad \forall j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Поскольку представление критерия  $W$  в виде квадратического функционала (3) не совсем удобно с точки зрения его реализации, то основной задачей в дальнейшем будет формулировка его в виде:

$$W' = \sum_j W'_j = \sum_j \sum_{i=1}^n x_{i,j} \cdot c_{i,j} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Обратимся к определению структур  $c_{i,j}$ , которые измеряют увеличение неопределенности при подстановке объекта  $\Omega_i$  в группу, где ведущим объектом является  $\Omega_j$ . Принимаем  $c_{i,i} = 0, \forall i = \overline{1, n}$ . Задача состоит в определении элементов матрицы  $c$ , расположенных ниже главной диагонали. При подстановке объекта  $\Omega_i$  в группу  $G_j$  происходит изменение величины критерия  $W$ , так как изменяется  $M(q)_j$ . В этом случае  $c_{i,j}$  естественно определить как дополнительную неопределенность, возникающую от включения объекта  $\Omega_i$  в группу, содержащую объекты  $\Omega_j, \Omega_{j+1}, \dots, \Omega_{i-1}$  с учетом условия (1). Для этой группы

$$W_j = \sum_{k=j}^{i-1} (q_k - M(q)_j)^2 = \sum_{k=j}^{i-1} \left( q_k - \frac{\sum_{k=j}^{i-1} q_k}{i-j} \right)^2. \quad (7)$$

Если в решении задачи достигается минимум выражения (3) с учетом (7), то в минимум обратится и соотношение

$$F = \sum_j F_j \quad (8)$$

с учетом

$$F_j = \sum_{k=j}^{i-1} q_k^2 - \frac{\left( \sum_{k=j}^{i-1} q_k \right)^2}{i-j}. \quad (9)$$

После включения объекта  $\Omega_i$  в группу  $G_j$  получаем:

$$F'_j = \sum_{k=j}^i q_k^2 - \frac{(\sum_{k=j}^i q_k)^2}{i-j+1}. \quad (10)$$

Тогда по определению

$$c_{i,j} = F'_j - F_j = q_i^2 - \frac{(\sum_{k=j}^i q_k)^2}{i-j+1} + \frac{(\sum_{k=j}^{i-1} q_k)^2}{i-j}. \quad (11)$$

Таким образом, путем определения значений  $c_{i,j}$  можно заменить нелинейную функцию (3) простой линейной (6), используя переменные  $x_{i,j}$  [4, 6]. При решении задачи необходимо учесть следующее. Так как количество объектов в группе неизвестно, а  $x_{1,1} = 1$  всегда, то необходимо заменить соотношение (4) выражением:

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} = n-1. \quad (12)$$

Условие о том, что каждый объект может одновременно находиться не более чем в одной группе, запишется следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (13)$$

Для получения именно  $M$  групп объектов следует учесть тот факт, что не может быть более  $M$  «ведущих» элементов:

$$\sum_{i=2}^n x_{j,i} = M-1 \quad (\text{так как } x_{1,1} \equiv 1). \quad (14)$$

Таким образом, задача группировки объектов в  $M$  групп в математическом виде запишется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} W' = \sum_j \sum_{i=1}^n x_{i,j} \cdot c_{i,j} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} = n-1; \\ x_{j,j} \geq x_{j+1,j} \geq x_{j+2,j} \geq \dots \geq x_{n,j}, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1, \quad (i = \overline{1, n}); \\ \sum_{i=2}^n x_{j,i} = M-1; \\ 0 \leq x_{i,j} \leq 1, \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}). \end{array} \right. \quad (15)$$

**Пример.** Пусть имеется 20 объектов, каждый из которых характеризуется показателем  $q$  (таблица 1).

Таблица 1 – Значения показателя  $q$  для рассматриваемых объектов

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$q_i$	6	8	8	11	14	14	15	16	18	18	20	22	22	23	25	25	26	26	29	30

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Требуется сгруппировать объекты в группы таким образом, чтобы в каждую из них входили объекты с наименьшим различием данного показателя. Используя модель группировки объектов (14), объединим объекты в восемь, семь, шесть, пять, четыре, три, две группы поочередно.

Рассмотрим решение задачи группировки объектов в шесть групп. Матрица значений  $c_{i,j}$ , рассчитанных в соответствии с выражением (11), представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов  $c$

$i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	10	6	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	26,4	18,7	13,5	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	17,6	11,2	6,75	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	20	13,3	8,45	3	0,66	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	23,1	16	10,8	5	2,08	1,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	37,5	28,6	21,4	13,3	8,45	6,75	4,17	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	30	22,2	16	9,52	5,63	4,05	2	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	47,1	37,4	29,4	20,6	14,8	12	8,45	5,33	2,67	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	66,9	55,3	45,5	34,7	27,1	22,9	17,6	12,8	8,33	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	56,6	46	37,2	27,8	21,2	17,1	12,6	8,53	5	3	0,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	62,9	51,9	42,6	32,7	25,6	21,1	16	11,5	7,5	5	2,08	0,67	0,5	0	0	0	0	0	0	0
15	86,7	73,9	62,8	50,9	42	36,1	29,4	23,1	17,3	13,3	8,45	5,33	4,17	2	0	0	0	0	0	0
16	75,9	64	53,8	43,1	35	29,5	23,5	18	13	9,52	5,63	3,2	2,08	0,67	0	0	0	0	0	0
17	83,8	71,5	60,8	49,6	41	35	28,5	22,5	17	13	8,59	5,63	4,05	2,08	0,67	0,5	0	0	0	0
18	74,5	63	53,2	42,9	35,2	29,6	23,8	18,4	13,6	10,1	6,45	4,02	2,7	1,25	0,33	0,17	0	0	0	0
19	123	108	95,3	81,6	70,9	62,9	54,3	46,1	38,4	32,4	25,7	20,6	17,4	13,3	9,8	8,33	6	4,5	0	0
20	132	117	103	89,4	78,2	69,7	60,6	51,9	43,8	37,2	30	24,5	20,6	16	12	9,8	6,75	4,17	0,5	0

Минимизируем линейный функционал

$$W' = 2x_{2,1} + 0,66x_{3,1} + \dots + 0x_{2,2} + 0x_{3,2} + 6x_{4,2} + \dots + 0x_{19,19} + 0,5x_{20,19} + 0x_{20,20} \quad (16)$$

при ограничениях:

$$1) x_{2,1} + x_{3,1} + \dots + x_{20,1} + x_{2,2} + x_{3,2} + \dots + x_{20,2} + x_{3,3} + x_{4,3} + \dots + x_{19,19} + x_{20,19} + x_{20,20} = 19; \quad (17)$$

$$2) x_{2,1} \geq x_{3,1}; x_{3,1} \geq x_{4,1}; \dots; x_{19,1} \geq x_{20,1}; x_{2,2} \geq x_{3,2}; x_{3,2} \geq x_{4,2}; \dots; x_{19,18} \geq x_{20,18}, x_{19,19} \geq x_{20,19}; \quad (18)$$

$$3) x_{2,1} + x_{2,2} = 1; x_{3,1} + x_{3,2} + x_{3,3} = 1; \dots; x_{20,1} + x_{20,2} + \dots + x_{20,20} = 1; \quad (19)$$

$$4) x_{2,2} + x_{3,3} + x_{4,4} + \dots + x_{19,19} + x_{20,20} = 5; \quad (20)$$

$$5) 0 \leq x_{i,j} \leq 1 \quad (i = 1, \dots, 20; j = 1, \dots, 20). \quad (21)$$

Задача решается с помощью стандартной программы мультипликативного алгоритма симплекс-метода [1]. Полученное решение имеет вид:  $x_{2,1} = 1, x_{3,1} = 1, x_{4,1} = 1, x_{5,5} = 1, x_{6,5} = 1, x_{7,5} = 1, x_{8,5} = 1, x_{9,9} = 1, x_{10,9} = 1, x_{11,9} = 1, x_{12,12} = 1, x_{13,12} = 1, x_{14,12} = 1, x_{15,15} = 1, x_{16,15} = 1, x_{17,15} = 1, x_{18,15} = 1, x_{19,19} = 1, x_{20,19} = 1.$

Решение дает группировку  $G_1, G_5, G_9, G_{12}, G_{15}, G_{19}$ , или по показателю транспортабельности:

$$(6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16)(18, 18, 20)(22, 22, 23)(25, 25, 26, 26)(29, 30).$$

Для полученного варианта группировки

$$W^{(6)} = W_1 + W_5 + W_9 + W_{12} + W_{15} + W_{19} = 20,334 = \min. \quad (22)$$

Чтобы решить задачу, например для семи групп, необходимо в ограничениях (17) – (21) поменять только условие 4:

$$x_{2,2} + x_{3,3} + x_{4,4} + \dots + x_{19,19} + x_{20,20} = 6. \quad (23)$$

Решив аналогичные задачи для остальных вариантов группировки, получаем:

две группы: (6, 8, 8, 11, 14, 14, 15, 16, 18, 18)(20, 22, 22, 23, 25, 25, 26, 26, 29, 30);

три группы: (6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16, 18, 18, 20)(22, 22, 23, 25, 25, 26, 26, 29, 30);

четыре группы: (6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16, 18, 18)(20, 22, 22, 23)(25, 25, 26, 26, 29, 30);

пять групп: (6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16, 18, 18)(20, 22, 22, 23)(25, 25, 26, 26)(29, 30);

семь групп: (6, 8, 8)(11)(14, 14, 15, 16)(18, 18, 20)(22, 22, 23)(25, 25, 26, 26)(29, 30);

восемь групп: (6, 8, 8)(11)(14, 14, 15, 16)(18, 18)(20)(22, 22, 23)(25, 25, 26, 26)(29, 30).

Приведенная модель (15) позволяет решить задачу, когда число групп известно заранее. На практике встречаются случаи, когда неизвестно и число групп. Для группировки объектов в оптимальное число групп используется понятие тесноты связи между объектами и между группами объектов.

Если объекты интерпретировать как точки в  $h$ -мерном пространстве, то похожим с позиций данного показателя объектам будут соответствовать и близко расположенные точки. Мету тесноты связи между объектами введем следующей евклидовой метрикой:

$$d_{i,j} = \sqrt{(q_i - q_j)^2}. \quad (24)$$

Тесноту связи  $d_1$  между двумя группами  $G_m$  и  $G_k$  выразим соотношением:

$$d_1(G_m, G_k) = \frac{1}{n_m \cdot n_k} \sum_{\Omega_i \in G_m} \sum_{\Omega_j \in G_k} d_{i,j}, \quad (25)$$

где  $n_m$  и  $n_k$  – количество объектов в группах  $G_m$  и  $G_k$  соответственно.

Тесноту связи  $d_2$  между элементами внутри групп выразим так:

$$d_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{\Omega_i, \Omega_j \in G_k} d_{i,j}. \quad (26)$$

Тогда каждый вариант группировки  $n$  объектов в  $M$  групп можно оценить с помощью величины

$$d = d_1 + d_2. \quad (27)$$

В качестве оптимального варианта группировки из всех возможных выбирается тот, для которого величина  $d$  минимальна:

$$d_{\text{опт}} = \min \{ d^{(M)} \}, \quad (M = \overline{n-1, 1}). \quad (28)$$

Критерий (6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16, 18, 18, 20)(22, 22, 23, 25, 25, 26, 26, 29, 30) внутренне непротиворечив: чем «компактнее» группы, тем меньше  $d_2$ , чем больше групп, тем больше  $d_1$ .

Для рассматриваемого примера евклидова матрица взаимных расстояний, рассчитанная по выражению (6, 8, 8, 11)(14, 14, 15, 16)(18, 18, 20)(22, 22, 23)(25, 25, 26, 26)(29, 30), представлена в таблице 3.

Для выбора оптимального варианта группировки определим величины  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d$  для каждого из них.

Таблица 3 – Матрица взаимных расстояний в евклидовой метрике

<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	2	2	5	8	8	9	10	12	12	14	16	16	17	19	19	20	20	23	24
2	2	0	0	3	6	6	7	8	10	10	12	14	14	15	17	17	18	18	21	22
3	2	0	0	3	6	6	7	8	10	10	12	14	14	15	17	17	18	18	21	22
4	5	3	3	0	3	3	4	5	7	7	9	11	11	12	14	14	15	15	18	19
5	8	6	6	3	0	0	1	2	4	4	6	8	8	9	11	11	12	12	15	16
6	8	6	6	3	0	0	1	2	4	4	6	8	8	9	11	11	12	12	15	16
7	9	7	7	4	1	1	0	1	3	3	5	7	7	8	10	10	11	11	14	15
8	10	8	8	5	2	2	1	0	2	2	4	6	6	7	9	9	10	10	13	14
9	12	10	10	7	4	4	3	2	0	0	2	4	4	5	7	7	8	8	11	12
10	12	10	10	7	4	4	3	2	0	0	2	4	4	5	7	7	8	8	11	12
11	14	12	12	9	6	6	5	4	2	2	0	2	2	3	5	5	6	6	9	10
12	16	14	14	11	8	8	7	6	4	4	2	0	0	1	3	3	4	4	7	8
13	16	14	14	11	8	8	7	6	4	4	2	0	0	1	3	3	4	4	7	8
14	17	15	15	12	9	9	8	7	5	5	3	1	1	0	2	2	3	3	6	7
15	19	17	17	14	11	11	10	9	7	7	5	3	3	2	0	0	1	1	4	5
16	19	17	17	14	11	11	10	9	7	7	5	3	3	2	0	0	1	1	4	5
17	20	18	18	15	12	12	11	10	8	8	6	4	4	3	1	1	0	0	3	4
18	20	18	18	15	12	12	11	10	8	8	6	4	4	3	1	1	0	0	3	4
19	23	21	21	18	15	15	14	13	11	11	9	7	7	6	4	4	3	3	0	1
20	24	22	22	19	16	16	15	14	12	12	10	8	8	7	5	5	4	4	1	0

Для варианта двух групп

$$d_1(G_1, G_{11}) = \frac{1}{10 \cdot 10} (d_{1,11} + d_{1,12} + \dots + d_{1,20} + d_{2,11} + d_{2,12} + \dots + d_{2,20} + \dots + d_{10,11} + d_{10,12} + \dots + d_{10,20}); \quad (29)$$

$$d_1(G_1, G_{11}) = \frac{1200}{100} = 12;$$

$$d_2 = d_2(G_1) + d_2(G_{11}) = (d_{1,2} + d_{1,3} + \dots + d_{1,10} + d_{2,3} + d_{2,4} + \dots + d_{2,10} + d_{3,4} + d_{3,5} + \dots + d_{9,10}) + (d_{11,12} + d_{11,13} + \dots + d_{11,20} + d_{12,13} + d_{12,14} + \dots + d_{19,20}); \quad (30)$$

$$d_2 = 230 + 168 = 398.$$

Для варианта трех групп

$$\begin{cases} d_1 = d_1(G_1, G_5) + d_1(G_1, G_{12}) + d_1(G_5, G_{12}), \\ d_2 = d_2(G_1) + d_2(G_5) + d_2(G_{12}); \end{cases} \quad (31)$$

$$d_1 = 34,17;$$

$$d_2 = 15 + 58 + 120 = 193.$$

Результаты расчета по вариантам группировки представлены в таблице 4, из которой видно, что оптимальным является четвертый вариант (четыре группы), так как для него показатель  $d$  имеет наименьшее значение.

На основе представленной модели разработан алгоритм группировки объектов с использованием модели целочисленного программирования. Алгоритм реализован в программной среде математического пакета Maple и позволяет производить группировку объектов, характеризующихся соответственно значениями показателей, в заданное количество непересекающихся групп, а также находить оптимальное число групп для разбиения.

Таблица 4 – Значения показателей  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d$

Количество групп	Показатели тесноты связи		
	$d_1$	$d_2$	$d$
1	0	1598	1598
2	12	398	410
3	34,17	193	227,17
4	61,67	94	155,67
5	104,33	62	166,33
6	142,17	33	175,17
7	206,17	22	228,17
8	252,42	18	270,42

Далее с учетом оптимального разбиения объектов внутри групп осуществляется разработка оптимального плана маневровых операций с использованием комбинаторного или распределительного метода. Выбор и обоснование показателя  $q$  является темой отдельного исследования. Эффект от применения указанной технологии выразится в сокращении времени на формирование многогруппных составов и снижении энергозатрат при выполнении маневровой работы в целом, причем технология тем эффективнее, чем большее число групп в поезде необходимо подобрать.

### Список литературы

1. Балдин, К. В. Методы оптимальных решений [Текст]: Учебник / К. В. Балдин, В. Н. Башлыков, А. В. Рукосуев. – М.: Флинта, 2014. – 386 с.
2. Бобровский, В. И. Автоматизация составления сортировочного листа при использовании комбинаторного метода сортировки вагонов [Текст] / В. И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на железнодорожных станциях: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский национальный ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1990. – С. 60 – 69.
3. Бобровский, В. И. Оптимизация формирования многогруппных составов [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте / Украинская гос. акад. ж.-д. трансп. – Харьков. – 2000. – № 6. – С. 10 – 14.
4. Васильев, В. И. Распознающие системы: Справочник [Текст] / В. И. Васильев. – Киев: Наукова думка, 1969. – 292 с.
5. Тишкин, Е. М. Метод комбинаторной сортировки вагонов – основа интенсивной технологии местной работы [Текст] / Е. М. Тишкин // Вестник ВНИИЖТа / Всероссийский НИИ ж.-д. трансп. – М. – 1987. – № 2. – С. 16 – 19.
6. Чернецкий, В. И. Математическое моделирование стохастических систем: Монография [Текст] / Петрозаводский гос. ун-т. – Петрозаводск, 1994. – 488 с.

### References

1. Baldin K. V. *Metodi Optimimalnih rechenii* (Methods of Optimization). Moscow, Flinta Publ., 2014, 386 p.
2. Bobrovsky V. I. Automation of compiling and sorting sheet when using of combinatorial method of sorting cars [Automatichizacia sostavlenia sortirovochnogo lista pri ispolzovanii combinatorialnogo metoda sortirovki vagonov]. *Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia sortirovochnogo protsesssa na zheleznodorozhnykh stantsiiakh – Mechanization and automation of the sorting process at railway stations*, 1990. – 60 – 69 p.
3. Bobrovsky V. I. Optimizations megagraphix compounds [Optimizations megagraphix compounds]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information and control systems on the railway transport*, 2000, no. 6, 10 – 14 p.
4. Vasilev V. I. *Raspoznachie sistemi* (Recognition systems). Kiev, Naukova dumka Publ., 1969, 292 p.
5. Tishkin E. M. Combinatorial method of classification is the basis of intensive technology local [Metod kombinatornoj sortirovki osnova intensivnoi technology mestnoi raboti].

*Vestnik Vserossiiskogo NII zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the research Institute of railway transport, 1987, no. 2, 16 – 19 p.*

6. Chernetsky V. I. *Mathematischeskoe modelirovanie stokhasticheskikh system* (Mathematical modeling of stochastic systems). Petrozavodsk, 1994, 488 p.

УДК 656.259.12:621.372.5: 517.54

С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов

## НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ КООРДИНАТЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТЦЕПОВ В ПОДГОРОЧНЫХ ПАРКАХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК

*В статье рассматриваются вопросы определения координаты подвижного состава на участке железнодорожного пути. Предложено и обосновано применение математического аппарата конформных отображений. Показаны результаты экспериментальных исследований.*

Согласно генеральной схеме развития и стратегической программе развития ОАО «РЖД» на перспективу до 2030 г., а также в связи с увеличивающимися в стране внутренними и транзитными грузопотоками одним из важнейших направлений инновации является создание «интеллектуальной» станции. Реализация данного направления возможна благодаря полной автоматизации, повышению эффективности и ускорению процесса формирования составов на сортировочных станциях. Одной из подсистем сортировочных станций является система контроля заполнения пути, которая в настоящее время выдает ограниченную и дискретную информацию о длине свободного участка подгорочного пути, наличии на нем «окон» между отцепами и о скорости движения отцепа.

Таким образом, возникает задача реализации непрерывного контроля координаты и скорости перемещения отцепов в подгорочных парках сортировочных горок, решение которой позволит увеличить производительность сортировочной горки.

В настоящее время определение координаты нахождения отцепа на спускной части сортировочных горок выполняется с помощью напольных технических средств: точечных путевых датчиков, рельсовых цепей, индуктивно-проводных датчиков, устройств импульсного зондирования. Учитывая наличие недостатков этих систем, а также трудности, связанные с их эксплуатацией, авторами предлагается альтернативное решение на основе математического аппарата конформных отображений с применением классической модели рельсовых цепей. Данный математический аппарат позволяет в режиме реального времени определять области входных сопротивлений рельсовой линии вне зависимости от изменения ее параметров, что дает возможность по изменению входного сопротивления определять координату отцепа на пути с высокой точностью.

В качестве контрольного сигнала для анализа состояния подгорочного пути предлагается использовать синусоидальное напряжение тональной частоты. Использование в предлагаемой математической модели рельсовой линии сигнального тока тонального диапазона позволит повысить защищенность от воздействия непрерывных и импульсных помех и применить существующую аппаратуру СЦБ (например, генератор ГПЗ ТРЦ).

Для исследования рельсовой линии при протекании по ней электрического тока тональной частоты представим ее как фрагмент классической схемы рельсовой цепи [1].

В качестве нагрузки четырехполюсника рассматривается область значений комплексных сопротивлений от значения  $Z = 0$  (короткого замыкания) до  $Z = \infty$  (разрыва или холостого хода). Так как действительная часть комплексного сопротивления всегда неотрицательна, то значение его представляет собой правую полуплоскость комплексных чисел. Как показано в работе [1], конформное отображение, соответствующее четырехполюснику, преобразует правую полуплоскость, дополненную бесконечно удаленной точкой, на окружность или по-

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

луплоскость, лежащую в правой полуплоскости. Положение области, получившейся при таком отображении, будет зависеть от параметров рельсового четырехполюсника, а положение точки внутри области – от сопротивления выходной нагрузки. Пример такого преобразования представлен на рисунке 1.

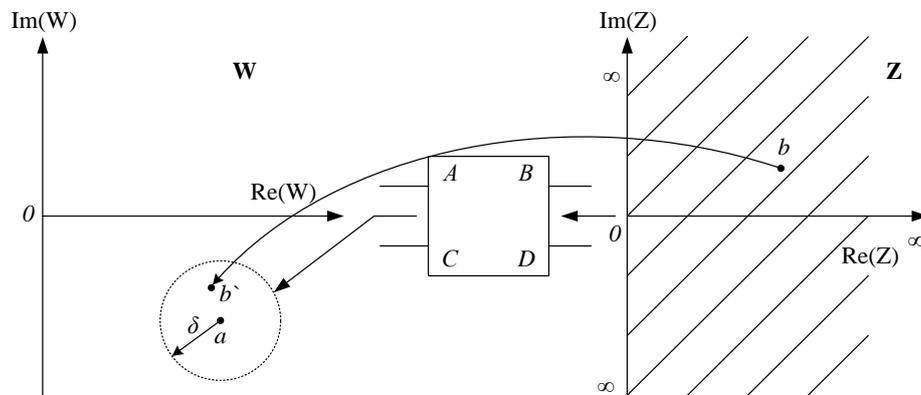


Рисунок 1 – Пример конформного преобразования на комплексной плоскости при фиксированных значениях параметров четырехполюсника рельсовой линии

Предложенный аппарат конформных отображений и дробно-линейных преобразований позволяет определить области изменения входных сопротивлений рельсовой линии. Для увеличения точности определения координаты отцепки необходимо обеспечить разрыв (наличие изолирующих стыков) в конце рельсовой линии [1].

С целью проверки эффективности применения аппарата конформных отображений для определения координаты наложения шунта на рельсовой линии путем определения ее входного сопротивления были проведены экспериментальные исследования на станции К Западно-Сибирской железной дороги.

Измерения производились с помощью многофункционального прибора инженера СЦБ (МПИ-СЦБ) на питающем конце рельсовой цепи длиной 625 м путем подключения МПИ-СЦБ к разделочным клеммам в путевом ящике (схема проведения эксперимента приведена на рисунке 2, где клеммы: 1 – 2 – для измерения напряжения на входе рельсовой линии, 2 – 3 – падения напряжения на резисторе R).

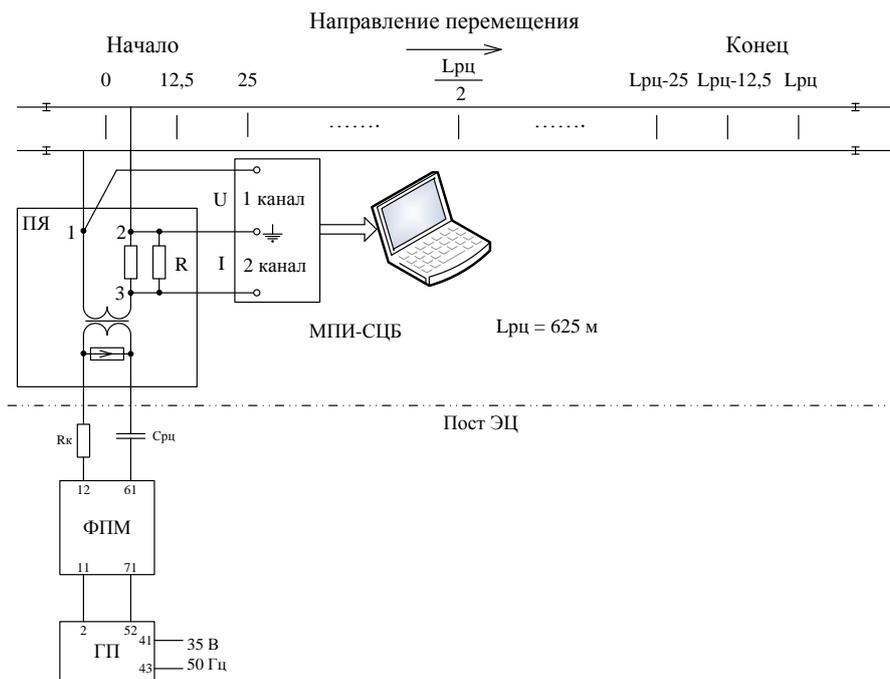


Рисунок 2 – Схема подключения прибора МПИ-СЦБ к аппаратуре ТРЦ

Для определения координаты места наложения шунта на рельсовой линии измерялись напряжение, ток и угол сдвига фаз между ними на входе рельсовой линии. Определение тока производилось косвенным путем на основании измерения напряжения на резисторе  $R$  номиналом  $0,28 \text{ Ом}$ . Фазовый сдвиг определялся автоматически программным продуктом ADC-VIEW.

Для определения параметров четырехполюсника схемы замещения проводились измерения при свободной и исправной рельсовой линии.

Для имитации движения отцепы производилось шунтирование рельсовой линии от начала с координатой  $0 \text{ м}$  и далее по всей ее длине с интервалом  $12,5 \text{ м}$  (см. рисунок 2).

Коэффициенты четырехполюсника  $A_{ш}$ ,  $B_{ш}$ ,  $C_{ш}$  и  $D_{ш}$  для расчета входного сопротивления рельсовой линии в шунтовом режиме могут быть найдены по формуле:

$$\begin{pmatrix} A_{ш} & B_{ш} \\ C_{ш} & D_{ш} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{вн} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ch \gamma l_2 & Z_b \cdot sh \gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh \gamma l_2 & ch \gamma l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{ш}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ch \gamma l_1 & Z_b \cdot sh \gamma l_1 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh \gamma l_1 & ch \gamma l_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $R_{вн}$  – вносимое сопротивление, учитывающее сопротивление измерительных проводов и качество подключения измерительной аппаратуры к рельсовой линии;

$l_1, l_2$  – расстояние шунта от конца и начала рельсовой линии соответственно.

Для определения  $R_{вн}$  можно воспользоваться соотношением

$$R_{вн} = W_0 - 0,06, \quad (2)$$

где  $W_0$  – измеренное входное сопротивление четырехполюсника рельсовой линии при наложении нормативного шунта с координатой  $0 \text{ м}$ .

На основании полученных результатов построены диаграммы изменения комплексного сопротивления рельсовой линии в зависимости от места наложения шунта. На рисунке 3 выполнено сопоставление расчетных теоретических и экспериментальных данных изменения активной, реактивной частей входного сопротивления и полного комплексного входного сопротивления рельсовой линии соответственно. Линией обозначены экспериментальные значения входного сопротивления рельсовой линии, крестиками – расчетные значения.

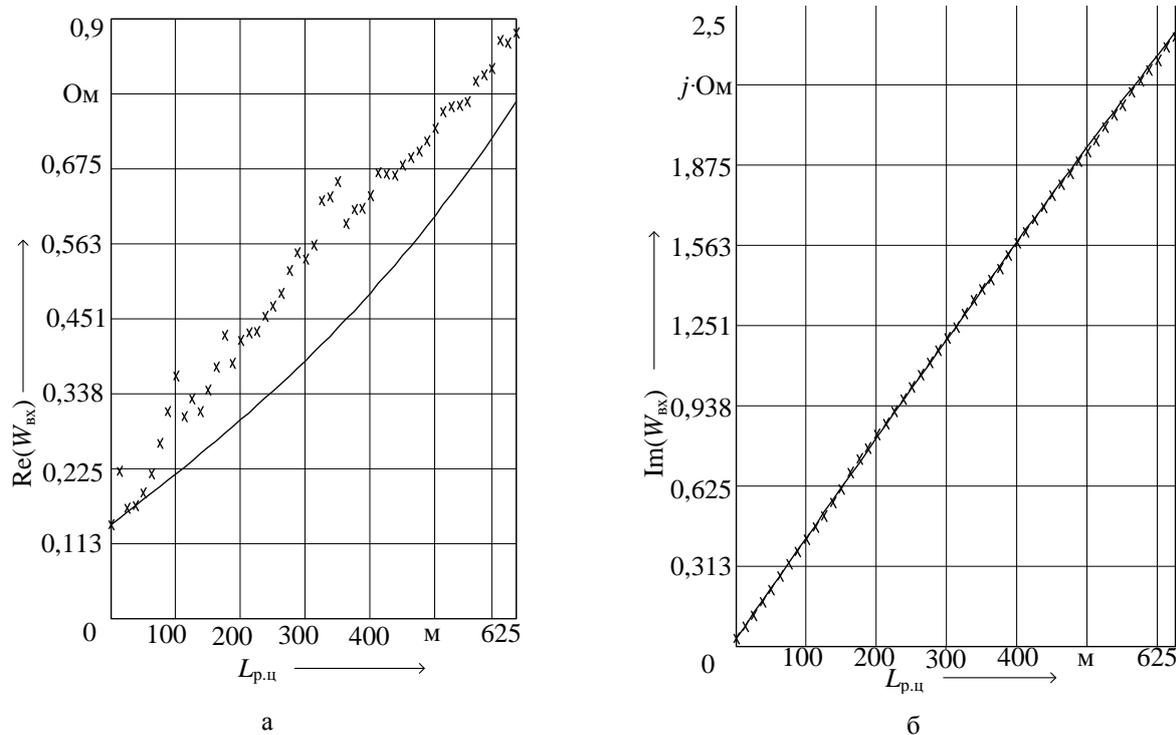


Рисунок 3 – График изменения активной (а) и реактивной (б) составляющих входного сопротивления рельсовой линии в зависимости от места наложения шунта

Из рисунка 3, б видно, что точность совпадений расчетной кривой и экспериментально полученных данных по реактивной составляющей входного сопротивления четырехполносника рельсовой линии достаточно высока. Однако активная часть сопротивления (рисунок 3, а) не дает такой высокой точности и вносит определенную погрешность. Поведение активной составляющей входного сопротивления можно объяснить изменением номинала сопротивления шунта по причине некачественного контакта «рельс – нормативный шунт» при проведении эксперимента. Расчет абсолютных и относительных погрешностей определения координаты положения шунта показал следующие значения: 6,5 м и 6 % соответственно.

Таким образом, возможность применения математического аппарата конформных отображений для контроля заполнения подгорочных путей сортировочных горок подтверждена аналитическими расчетами [1] и проведенными экспериментальными исследованиями.

Произведем расчет комплексного входного сопротивления рельсовой линии для конкретных координат положения шунта при изменении его номинала в пределах от 0,01 до 0,3 Ом, с шагом 0,01 Ом. Расчетные значения входного сопротивления рельсовой линии и его сопоставление с экспериментальными данными показано на рисунке 4, крестиками показаны результаты расчета значений входного сопротивления рельсовой линии в зависимости от увеличения номинала вносимого шунта с интервалом наложения 12,5 м по всей рельсовой линии, линией показаны экспериментально полученные данные.

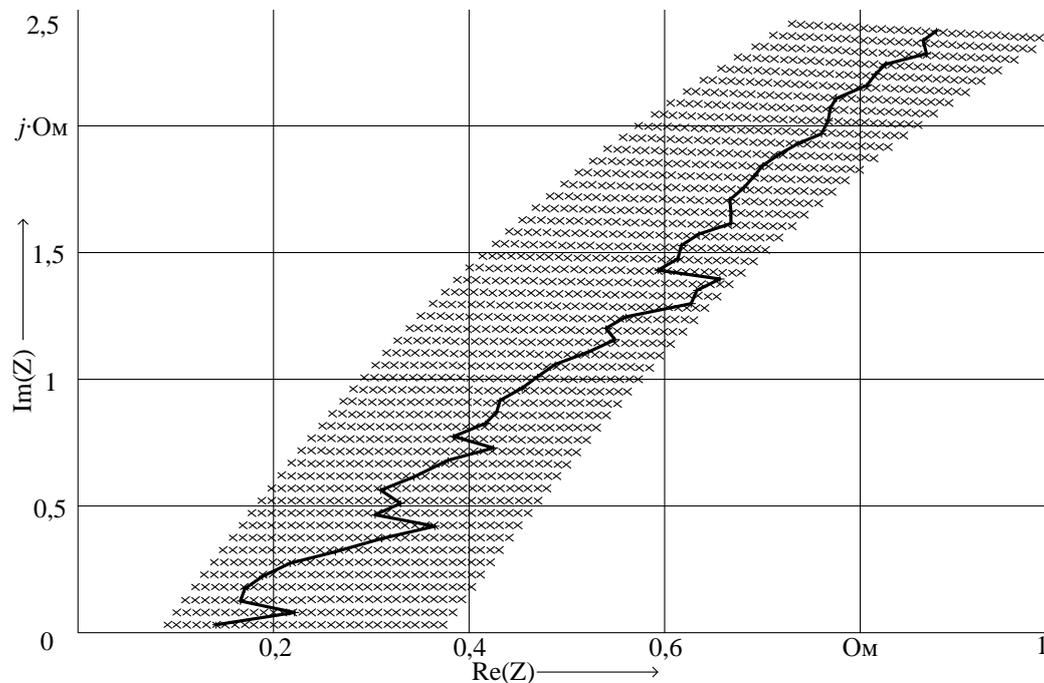


Рисунок 4 – График изменения входного сопротивления рельсовой линии в зависимости от места положения шунта и его номинала

График на рисунке 4 объясняет появившееся в ходе экспериментальных исследований резкое изменение активной составляющей входного сопротивления как следствие нестабильного контакта между рельсами и нормативным шунтом при его перемещении. Расчет абсолютных погрешностей определения координаты положения шунта на рельсовой линии по первому и второму способам показаны на рисунке 5, где жирной линией показаны погрешности определения координаты положения шунта по комплексному сопротивлению, а тонкой линией – по реактивной части входного сопротивления.

Коллективом авторов на основе проведенных экспериментальных и аналитических исследований с использованием предложенного математического аппарата получены патенты РФ на полезную модель [2 – 4].

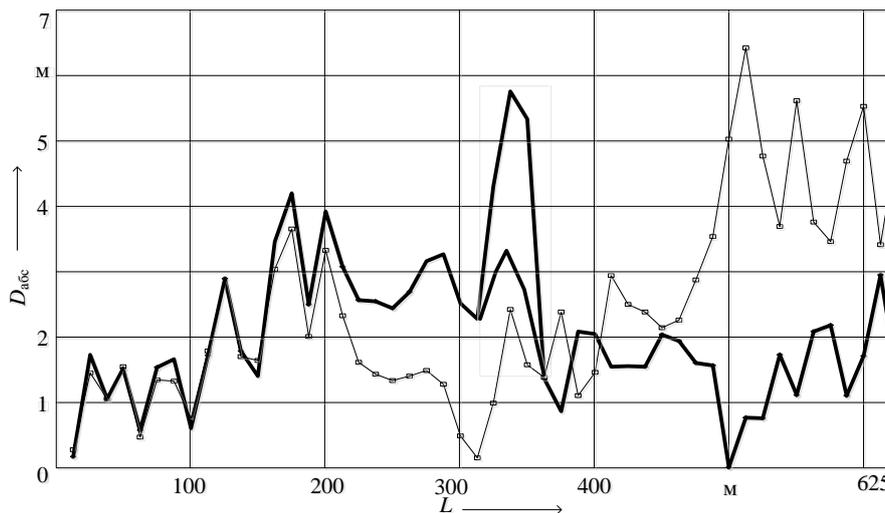


Рисунок 5 – Изменение абсолютной погрешности определения координаты места положения одиночного шунта

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Предложенный аппарат конформных отображений и дробно-линейных преобразований позволяет определить области изменения входных сопротивлений четырехполюсника рельсовой линии, поведение исследуемой модели рельсовой линии соответствует классической модели работы рельсовых цепей.

2. Графическое представление областей входных сопротивлений рельсовой линии позволяет оценить влияние отдельных параметров рельсового четырехполюсника на результат конформного отображения правой полуплоскости выходных значений на область входных.

3. Возможность применения математического аппарата конформных отображений для контроля заполнения подгорочных путей сортировочных горок подтверждена аналитическими расчетами и проведенными экспериментальными исследованиями. Расхождение результатов расчетов с экспериментальными данными не превышает 7 %.

4. Предложенная методика определения координаты отцепа в подгорочном парке сортировочных горок может быть использована как наглядное и эффективное средство исследования функциональных зависимостей выходных электрических параметров рельсовых цепей от их внутренних (проводимость изоляции, изменение сопротивления токопроводящих и изолирующих стыков) и внешних (помехи электрического тягового подвижного состава, линий электропередач) параметров в широком диапазоне их изменения.

### Список литературы

1. 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.

2. Пат. 123388 Российская Федерация, МПК В 61 L 23/16, В 61 L 25/04. Устройство для контроля состояния рельсовой линии и заполнения пути [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов (Россия). – № 2012131842/11; Заявлено 24.07.2012; Оpubл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

3. Пат. 130942 Российская Федерация, МПК В 61 L 25/00. Устройство для контроля состояния рельсовой линии и заполнения пути [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов, Е. С. Древинская (Россия). – № 2013109042/11; Заявлено 24.07.2012; Оpubл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

4. Пат. 141222 Российская Федерация, МПК В 61 L 25/00. Устройство для контроля состояния рельсовой линии и заполнения пути [Текст] / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов (Россия). – № 2013147520/11; Заявлено 24.10.2013; Оpubл. 27.05.2014. Бюл. № 15.

## References

1. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M., Hodkevich A. G. [Primenenie apparata konformnykh otobrazhenii dlia nepreryvnogo kon-trolia koordinaty podvizhnoi edinitsy na puti]. *Izvestiia Transsiba– The Trans-Siberian Bulletin*, 2014. – № 1 (17). – S. 88 – 94.
2. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M. *Patent RU 123388*, 27.12.2012.
3. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M., Drevinskaia E. S. *Patent RU 130942*, 27.12.2012.
4. Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M. *Patent RU 141222*, 27.05.2014.

УДК 656.212.2.073.22

Е. Д. Псеровская, С. Ю. Хорунжин

## О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И СТОИМОСТЬ ПЕРЕВОЗКИ

*Размещение и крепление грузов при их перевозке назначением на станции железных дорог Российской Федерации производятся согласно положениям Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах ЦМ-943 (ТУ) [1]. Требования отдельных пунктов ТУ влияют не только на безопасность движения поездов, но и на стоимость перевозки и, как следствие, – на прибыль ОАО «РЖД».*

Размещение и крепление грузов при их перевозке назначением на станции железных дорог Российской Федерации производятся согласно положениям Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах ЦМ-943 (ТУ) [1]. Требования отдельных пунктов ТУ влияют не только на безопасность движения поездов, но и на стоимость перевозки и, как следствие, – на прибыль ОАО «РЖД». Руководствуясь стремлением повысить прибыль, грузоотправители часто трактуют некоторые положения ТУ так, как им выгодно.

Пунктом 6.3 главы 1 ТУ предусмотрено, что при размещении грузов общий центр тяжести должен располагаться на линии пересечения продольной и поперечной плоскостей симметрии вагона. В исключительных случаях, когда данное требование невыполнимо по объективным причинам, допускается смещение общего центра тяжести грузов относительно плоскостей симметрии. Положениями ТУ установлены также допустимые смещения общего центра тяжести груза относительно плоскостей симметрии вагона в зависимости от массы груза для продольных сдвигов. Аналогично рассчитывается величина смещения груза в поперечном направлении, но при этом учитывается еще и высота общего центра тяжести вагона с грузом над уровнем головок рельсов. Величина этих сдвигов может достигать 3000 мм вдоль вагона и 620 мм – поперек. Проще говоря, сдвиги груза как вдоль, так и поперек вагона официально не запрещены, но нет конкретных пояснений, в каких случаях они допустимы.

Рассмотрим два аспекта данной проблемы.

Во-первых, смещение центра тяжести грузов относительно осей симметрии вагонов оказывает негативное влияние на срок их эксплуатации, а также угрожает безопасности движения поездов и эксплуатации железнодорожного транспорта. Проведенные в работах [2 – 4] исследования показывают, что сдвиги в принципе недопустимы, поскольку в этом случае происходит выворачивание упорных средств крепления и нарушение упругих средств крепления вплоть до их полного разрушения, в то время как в противоположном направлении наблюдается провисание элементов крепления.

Все это создает прямую угрозу безопасности перевозочного процесса и сохранности подвижного состава: происходит перегруз буксовых узлов, приводящий к их перегреву, перегруз надрессорных балок и боковых рам тележек вагона. Возникает усталость металла, что может повлечь за собой излом литых деталей и сход подвижного состава с рельсов. В итоге сокращается срок службы подвижного состава.

Во вторых, согласно Прейскуранту 10-01 одним из критериев, влияющих на стоимость перевозки груза, является его соответствие установленным габаритам погрузки. Желая минимизировать транспортные расходы и сократить срок доставки, грузоотправители стремятся разместить груз таким образом, чтобы он не выходил за пределы основного габарита погрузки, прибегая при этом к смещению центра тяжести груза относительно осей симметрии вагона.

Исследованиями, проведенными в Сибирском государственном университете путей сообщения, установлено, что, как правило, размещение груза со смещением центра тяжести относительно продольной оси вагона производят при перевозке грузов третьего тарифного класса (конструкции металлические, машины различного назначения, оборудование, не поименованное в алфавите, и др.) высотой 2700 – 3980 м, шириной 2500 – 3400 м, массой 15 – 45 т, имеющих неодинаковое поперечное сечение по длине груза и центр тяжести, расположенный несимметрично относительно его опорных поверхностей. В результате исследований установлено также, что, как правило, смещение центра тяжести, грузов относительно продольной оси производят на 50 – 300 мм, что позволяет вписать груз в основной габарит погрузки или понизить степень его негабаритности.

Практика показывает, что в зависимости от рода груза процент отправляемых со смещением центра масс грузов от общего количества отправленных грузов составляет, %: конструкции металлические – 10; машины различного назначения – 16; оборудование различного назначения, не поименованное в алфавите, – 5; оборудование электротехническое – 14.

Рассмотрим пример такого размещения груза и определим его влияние на нагрузки, воспринимаемые вагоном при перевозке.

На рисунке 1, а размещено оборудование (конструкции металлические) массой 35 т с расположением центра тяжести груза на линии пересечения продольной и поперечной осей вагона. При данном способе размещения груза точка А выходит за пределы основного габарита погрузки, в результате чего груз имеет первую степень верхней зоны негабаритности (индекс негабаритности Н001).

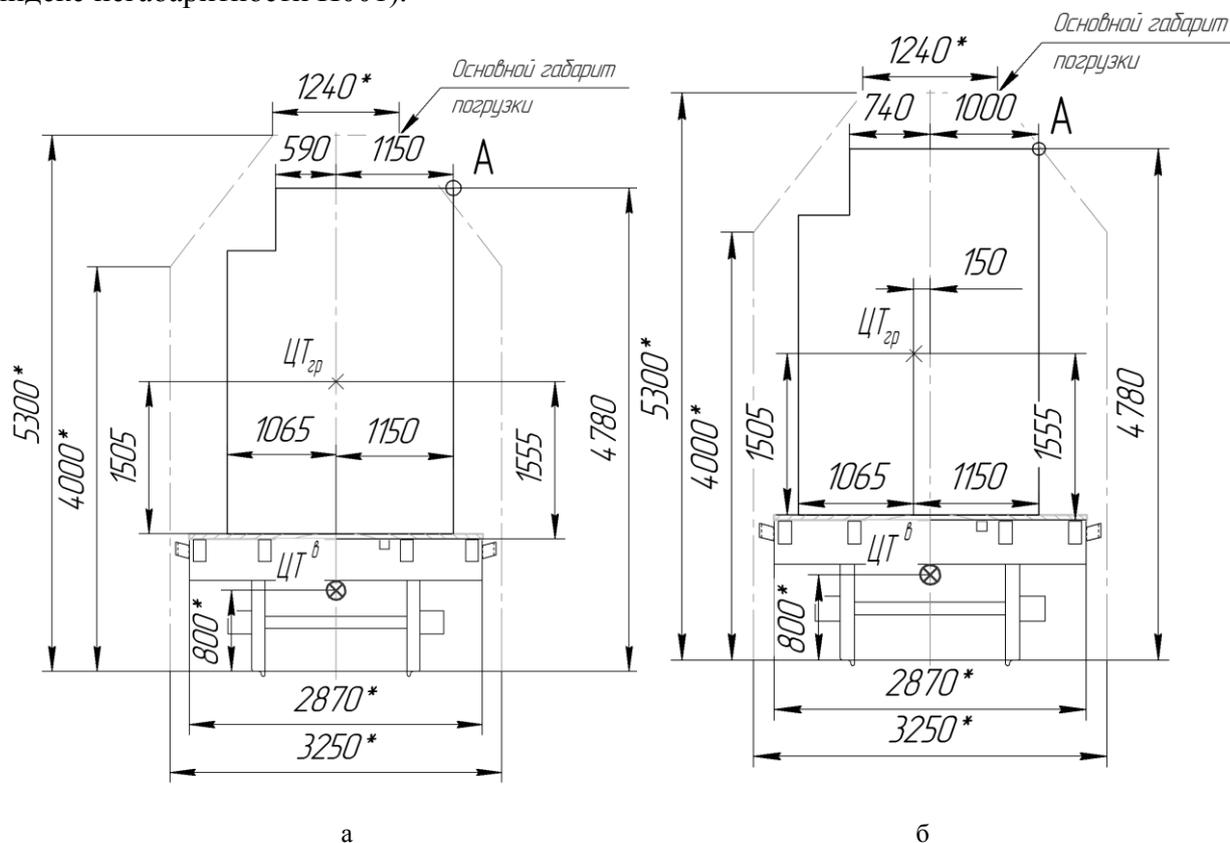


Рисунок 1 – Размещение оборудования на платформе с расположением центра тяжести груза: на линии пересечения продольной и поперечной осей симметрии вагона (а) и со смещением относительно продольной оси вагона (б)

Смещение груза влево (рисунок 1, б) относительно продольной оси вагона на 150 мм позволит разместить груз на вагоне в пределах основного габарита погрузки. Для установления возможности такого размещения определим допустимое ТУ поперечное смещение общего центра тяжести груза от продольной плоскости симметрии вагона, его величина зависит от массы груза ( $Q_{гр} = 35$  т) и высоты центра масс  $H_{цт}^o$ .

Высота общего центра масс вагона с грузом [1, (19)]

$$H_{цт}^o = \frac{Q_{гр}(h_{ц.м}^{гр} + h_n) + Q_t \times h_t}{Q_{гр} + Q_t}; \quad (1)$$

$$H_{цт}^o = \frac{35 \cdot (1555 + 1415) + 21,1 \cdot 1130}{35 + 21,1} = 2278 \text{ мм},$$

где  $h_{ц.м}^{гр}$  – высота центра масс груза относительно пола вагона;

$h_n$  – высота от уровня головки рельса до пола вагона;

$h_t$  – высота центра масс вагона;

$Q_t$  – масса тары вагона.

Интерполируя значения, приведенные в работе [1, таблица 11], по массе и высоте центра масс, получим допустимое значение смещения  $b_c$  для заданных условий:

$$\text{при } H_{цт}^o = 2000 \text{ мм} \quad b_c = 350 - \frac{(350 - 250)(35 - 30)}{50 - 30} = 325 \text{ мм};$$

$$\text{при } H_{цт}^o = 2300 \text{ мм} \quad b_c = 290 - \frac{(290 - 200)(35 - 30)}{50 - 30} = 268 \text{ мм};$$

$$\text{при } H_{цт}^o = 2278 \text{ мм} \quad b_{доп} = 325 - \frac{(325 - 268)(2278 - 2000)}{2300 - 2000} = 272 \text{ мм}.$$

Таким образом, допустимое смещение составило 272 мм, что более требуемого (150 мм) по ТУ для вписывания в основной габарит погрузки при размещении груза со смещением центра масс относительно продольной оси вагона. Следовательно, данный груз при таком размещении может быть принят к перевозке.

Смещение груза создает потенциально опасную ситуацию, угрожающую безопасности движения и сохранности деталей подвижного состава вследствие перегрузки буксовых узлов, приводящих к их перегреву, разрушению надрессорных балок и боковых рам тележек.

Для подтверждения данных выводов воспользуемся результатами аналитических исследований, приведенных в статье [4], и определим реакции комплектов пружин:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_A = \frac{Q_c}{4} \left( 1 - \frac{y_c}{l} - \frac{x_c}{l_b} \right) - \frac{I_{ey} h_c - M_{ey}}{4l} - \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_B = \frac{Q_c}{4} \left( 1 + \frac{x_c}{l_b} - \frac{y_c}{l} \right) - \frac{I_{ey} h_c - M_{ey}}{4l} + \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_C = \frac{Q_c}{4} \left( 1 - \frac{x_c}{l_b} + \frac{y_c}{l} \right) + \frac{I_{ey} h_c - M_{ey}}{4l} - \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \\ R_D = \frac{Q_c}{4} \left( 1 + \frac{x_c}{l_b} + \frac{y_c}{l} \right) + \frac{I_{ey} h_c - M_{ey}}{4l} + \frac{I_{ex} h_c - M_{ex}}{4l_b}; \end{array} \right. \quad (2)$$

На рисунке 2 приведена динамическая модель нагрузок, воспринимаемых комплектами пружин тележек вагона. Комплекты пружин, обозначенные  $D$  и  $B$ , являются передними по ходу движения вагона. Так как груз смещен только относительно продольной оси вагона, то наиболее нагруженными будут комплекты  $D$  и  $C$ . Соответственно в расчетах смещение груза вдоль вагона, т. е. относительно поперечной оси,  $x_c$  принимаем равным нулю.

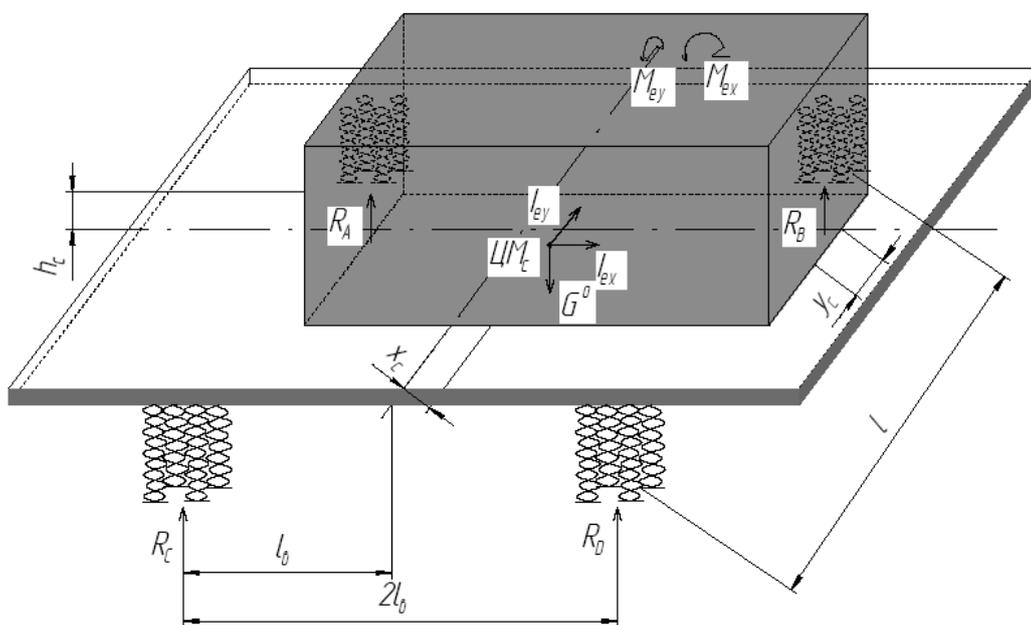


Рисунок 2 – Динамическая модель грузов, воспринимаемых комплектами пружин тележек вагона

На основании расчетов, выполненных по формулам (2), построим график зависимости реакций в комплектах пружин от величины смещения центра масс груза поперек вагона (рисунок 3). Из графика на рисунке 3 видно, что разница в загрузке правых по ходу движения пружин по отношению к левым составляет от 49,1 до 208,8 кН при изменении величины сдвига центра масс груза от 10 до 300 мм соответственно. Самым загруженным является комплект пружин *D*, его загрузка составляет до 35,8 % от общей нагрузки, в то время как реакция комплекта *A* (самого разгруженного) составляет лишь 14,2 %, что в 2,5 раза меньше.

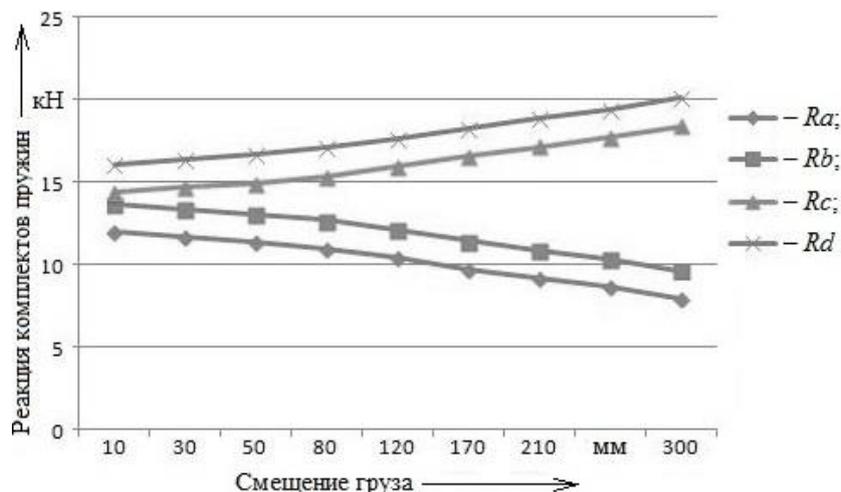


Рисунок 3 – Зависимости реакций комплектов пружин от величины смещения груза относительно продольной оси вагона

Таким образом, можно сделать вывод об отрицательном влиянии допускаемых ТУ смещений центра масс груза относительно осей вагона на безопасность движения поездов и эксплуатации подвижного состава.

Рассмотрим, как стоимость перевозки груза изменяется в зависимости от способа его размещения на вагоне.

На рисунке 4, а приведены графики изменения тарифа (инфраструктурной составляющей) перевозки при отправлении конструкций металлических массой 35 т на платформе, серым цветом – размещенных в пределах основного габарита погрузки, как показано на рисунке 1, б, и черным цветом – в первой зоне верхней степени негабаритности, как показано на рисунке 1, а. Для полноты картины на рисунке 4, б приведем аналогичные графики для этого же груза, размещенного во второй (серый цвет) и третьей (черный цвет) зонах верхней степени негабаритности соответственно.

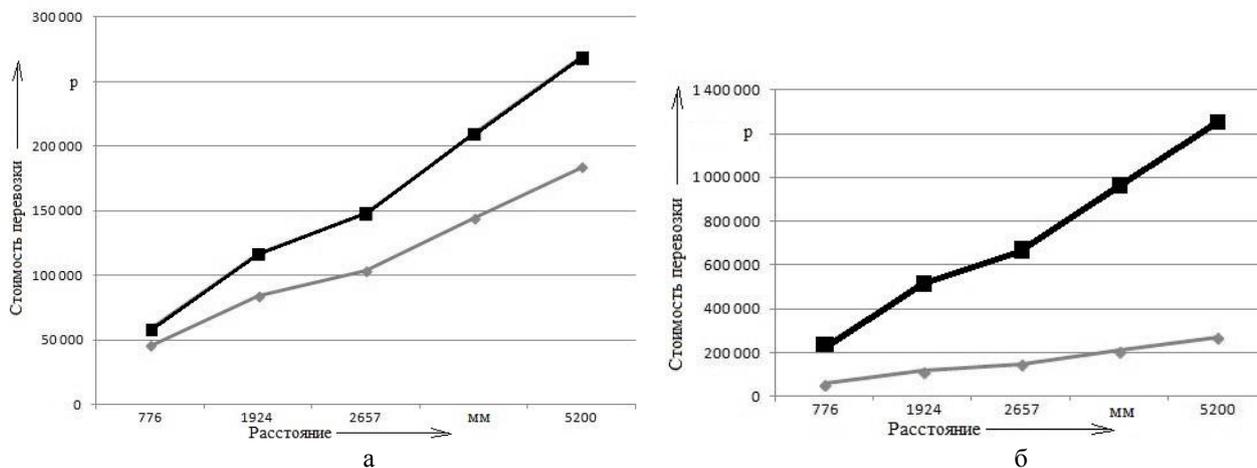


Рисунок 4 – График зависимости стоимости перевозки от расстояния для груза, расположенного в пределах основного габарита погрузки и первой степени верхней зоны негабаритности (а) и в зонах второй и третьей степени верхней негабаритности (б)

Анализ графиков, представленных на рисунках 3 и 4, показывает, что смещение центра тяжести относительно продольной оси вагона позволяет снизить стоимость перевозки более чем в 5,5 раза.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что неоднозначность требований ТУ отрицательно влияет не только на безопасность движения поездов, сохранность перевозимых грузов и подвижного состава, но и на прибыль ОАО «РЖД».

### Список литературы

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах [Текст]. – М.: Юртранс, 2003. – 544 с.
2. Анисимов, П. С. Оценка устойчивости колеса на рельсе при поперечном смещении центра массы тяжеловесного груза [Текст] // Тезисы докладов третьей науч.-практ. конф. «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» / П. С. Анисимов / Московский ин-т инж. ж.-д. трансп. – М., 2001. – С. 4, 5.
3. Туранов, Х. Т. Математическое моделирование рамных сил при движении подвижного состава с несимметрично размещенным грузом [Текст] / Х. Т. Туранов, А. Р. Якупов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2011. – № 2. – С. 47 – 51.
4. Туранов, Х. Т. Некоторые проблемы размещения грузов на вагоне [Текст] / Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская // Вестник Восточно-украинского национального ун-та им. Владимира Даля / Восточно-украинский национальный ун-т им. Владимира Даля. – Луганск. – 2013. – № 9 (198). – Ч. I. – С. 153 – 157.

### References

1. *Tekhnicheskie usloviia razmeshcheniia i krepneniia gruzov v vagonakh i konteinerakh 27.05.2003, № TsM – 943* (Specifications of placement and fastening of freights in cars and containers of 27.05.2003 no TsM – 943), Moscow, 2003.
2. Anisimov P. S. Otsenk of stability of a wheel on a rail at cross shift of the center of mass of heavy freight [Otsenka ustoichivosti koleasa na rel'se pri poperechnom smeshchenii tsentra massy

tiazhelovesnogo gruzu]. *Tezisy докладov tret'ej nauchno-prakticheskoy konferencii «Resursos-beregajushhie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte»* ( Abstracts of the third scientific-practical conference «Resource-saving technologies for rail transport»). Moscow, 2001, p. 4 – 5.

3. Turanov H. T. Mathematical modeling of frame forces at movement of a rolling stock of c by asymmetrically placed freight [Matematicheskoe modelirovanie ramnykh sil pri dvizhenii podvizhnogo sostava s nesimmetrichno razmeshchennym gruzom]. *Transport Urala – Transport of Ural*, 2011, no. 2, pp. 47 – 51.

4. Turanov H. T. Some problems of placement of freights on car [Nekotorye problemy razmeshcheniia gruzov na vagone]. *Vestnik Vostochnoukrainskogo nacional'nogo universiteta im. Vladimira Dalja – Herald of the East-Ukrainian National Univ Volodymyr Dahl*, 2013, no. 9 (198), T. 1, pp.153 – 157.

УДК 656.212.078(571.6)

Е. Э. Червотенко, А. Р. Калинина

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ТРАНЗИТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

*Приоритетным направлением экономического развития Дальнего Востока является его ориентация на связи со странами АТР. Через регион проходят крупнейшие железнодорожные магистрали – Транссибирская и Байкало-Амурская, имеющие выход к дальневосточным портам, что способствует росту объемов внешнеторговых операций и увеличению транзитного грузопотока в регионе. Расширение транспортно-экономических связей нашей страны на Дальнем Востоке, реализация ряда программ добывающей отрасли в зоне БАМа, осуществление проектов по развитию морских портов Дальнего Востока приведет к возникновению повышенных нагрузок на железнодорожную инфраструктуру региона. Важную роль в процессе перевозок играют технические станции, на которых обрабатывается весь транзитный поездопоток, поэтому на современном этапе актуальным является выбор рационального варианта развития технических станций с учетом экологических факторов.*

Дальний Восток является транспортным транзитным регионом Российской Федерации, его роль в обеспечении продвижения транзитного грузопотока возрастает как с увеличением межрегионального грузооборота, так и в результате развития экспортно-импортных связей России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

Железнодорожная транспортная инфраструктура Дальнего Востока обладает существенными возможностями для своего развития. По территории Дальневосточного региона проходят международные транспортные коридоры, основанные на двух широтных железнодорожных магистралях – Транссибирской и Байкало-Амурской. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 887-р, предусматривает плановое наращивание транзитных грузопотоков по Транссибирской и по Байкало-Амурской магистралям до 100 млн т по каждой. Постепенное увеличение объемов перевозок связано с пятилетними планами освоения минеральных ресурсов зоны БАМа, прилегающих к ней территорий Амурской области и Южной Якутии, а также за счет увеличения доли международного транзита, роста экспортных и импортных грузопотоков, перспективы увеличения контейнерных перевозок.

На основании анализа государственной целевой программы «Развитие транспортной системы Хабаровского края», утвержденной постановлением правительства Хабаровского края от 5 мая 2012 г. № 146-пр, слабым звеном в освоении перспективных грузопотоков является высокая загруженность железнодорожной сети, сдерживающая реализацию планируемых инвестиционных проектов. Развитие железнодорожной инфраструктуры – строительство вторых путей и электрификация БАМа, строительство и реконструкция мостовых и тоннель-

ных переходов на магистралях и др. – должно рассматриваться в комплексе не только со строительством и переустройством малых отдельных пунктов сети, но и с развитием крупных технических станций, входящих в состав железнодорожных узлов.

В условиях Дальнего Востока транзитные железнодорожные узлы (ТЖДУ) исполняют ведущую роль в работе с транзитным (маршрутным) поездопотоком. Как правило, это узлы с одной крупной технической станцией – участковой или сортировочной, на которой производятся обработка транзитных вагонопотоков, смена локомотивов и локомотивных бригад.

В настоящее время пропускные возможности узловых технических станций дальневосточных магистралей практически не имеют резерва. Для освоения значительных планируемых транзитных поездопотоков необходимо их развитие либо коренное переустройство. Постепенный поэтапный ввод мощностей позволит рационально распределить инвестиционные вложения, добиваясь минимальных эксплуатационных расходов.

Проблемы этапного развития железнодорожных узлов всегда были и остаются сложными и актуальными. Применение методов этапного развития для станций транзитных железнодорожных узлов позволит ликвидировать потери пропускной способности и стабилизировать работу станций в межэтапные периоды.

Целью настоящей работы является разработка мероприятий: организационно-технологических, реконструктивных и экологических, направленных на выполнение задачи этапного развития технических станций транзитных железнодорожных узлов Восточного полигона БАМа.

Для комплексного решения задачи развития исследуемой системы ТЖДУ рассматриваются следующие аспекты:

инфраструктурный: формирование области эффективных альтернативных решений развития транзитных железнодорожных узлов в соответствии с этапами наращивания их мощностей;  
экономико-эксплуатационный: оптимизация приведенных расходов в пределах работы узла;  
инженерно-экологический: выбор альтернативного варианта проектного решения с учетом факторов охраны окружающей природной среды

Восточный полигон Байкало-Амурской магистрали в направлении Хани – Тында – Ургал – Комсомольск – Ванино входит в состав Дальневосточной железной дороги. Текущее техническое состояние перечисленных железнодорожных станций, в том числе и узловых, таково, что они загружены примерно на 65 %. Несмотря на имеющийся резерв пропускной способности значительный рост перспективных размеров движения (более чем в семь раз) приведет к острой проблеме их беспрепятственного пропуска через технические станции.

Анализ потребного и наличного числа путей на станциях показал, что для обработки транзитного поездопотока понадобится существенное дополнительное путевое развитие. В настоящее время развитие существующих парков (транзитных, приемоотправочных) станций Тында, Новый Ургал, Комсомольск-Сортировочный и других крайне затруднительно из-за плотной станционной застройки, сложной конструкции горловин, плотно прилегающей к станционной территории селитебной зоны, близкого расположения естественных водных преград и автомобильных дорог. В связи с этим предлагается реорганизовать работу узла с выносом всей или части транзитной работы на ближайшие малые отдельные пункты.

Таким образом, при развитии ТЖДУ рассматриваются следующие варианты его переустройства:

только технической станции (строительство нового парка);

технической (возможное развитие имеющегося парка) и промежуточной (разъезда), располагающейся со стороны наибольшего транзитного потока, с выносом части транзитной работы на малый отдельный пункт;

только промежуточной станции (разъезда) с выносом всей транзитной работы на эту станцию.

Математически это можно описать следующим образом. ТЖДУ рассматривается как совокупность станций: технической и ближайших к ней малых отдельных пунктов (промежуточных станций, разъездов) прилегающих участков, работающих во взаимодействии. Исходя

из данного условия элементами ТЖДУ являются техническая станция ( $T$ ), малые раздельные пункты ( $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i$ ), перегоны между технической и промежуточными станциями ( $L_1, L_2, \dots, L_i$ ).

Тогда исходя из данного условия число рассматриваемых малых раздельных пунктов будет равно числу подходов к технической станции. Таким образом, узел представляет собой систему  $S_i = \{T_i \Pi_i^n\}$ , где  $T_i$  – подсистема «техническая станция»,  $\Pi_i^n$  – подсистема «малый раздельный пункт»,  $i$  – состояние подсистемы (в начальном состоянии  $i = 0$ ),  $n$  – число подходов к технической станции ( $n = \overline{1; N}$ ).

Исходное состояние системы (узла) представляет собой множество начальных состояний его подсистем (станций узла):

$$S_0 = \{T_0 \Pi_0^1 \Pi_0^2 \dots \Pi_0^n\}. \quad (1)$$

Согласно этапам наращивания мощности транзитного грузопотока  $V_k$  к заданным периодам  $t_k$  требуется адаптировать станции транзитного узла к планируемым размерам движения для обеспечения потребной пропускной способности узла с минимумом приведенных затрат  $\mathcal{E}_{пр}$  за весь планируемый период  $T_{пл}$ . Количество рассматриваемых этапов равно  $k$  ( $k = \overline{1; K}$ ).

Необходимо отметить, что переустройство станций узла связано только с увеличением транзитных размеров движения, размеры перерабатываемых потоков остаются без изменения или их рост незначителен.

Если рассматривать развитие основной технической станции и параллельно этому вариант развития малого раздельного пункта, через который следует преимущественный транзитный или весь транзитный грузопоток, то модель упрощается, и начальное состояние системы запишется в виде:

$$S_0 = \{T_0 \Pi_0\}. \quad (2)$$

Тогда условие развития ТЖДУ можно представить в виде совокупности переходов из исходного состояния системы к одному из последующих с помощью совокупности альтернативных решений:

$$T_0 \Pi_0 \rightarrow \begin{cases} T_1 \Pi_0; \\ T_1 \Pi_1; \\ T_0 \Pi_1. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве критерия выбора рационального варианта проекта развития принимается сумма приведенных строительно-эксплуатационных затрат

$$\min \mathcal{E}_{пр} = \sum_{t=0}^{T_{пл}} K_t \alpha_t + (1 - \gamma) \sum_{t=0}^{T_{пл}} C_t \alpha_t, \quad (4)$$

где  $T_{пл}$  – планируемый период наращивания мощности станций, год;  $\gamma$  – доля налоговых отчислений от прибыли (при расчете народнохозяйственной эффективности  $\gamma = 0$ );  $K_t$  и  $C_t$  – инвестиционные вложения и эксплуатационные расходы в год  $t$ ;  $\alpha_t$  – коэффициент приведения разновременных стоимостных показателей учитывает уменьшение значимости затрат, совершаемых через  $t$  лет, определяется по формуле  $\alpha_t = 1/(1 + E)^t$ ;  $t$  – расчетный период, год;  $E$  – норма дисконта.

Инвестиционные вложения формируются из затрат на переустройство или новое строительство путевого развития, устройство пунктов технического и коммерческого осмотра, оборудование путей и стрелочных переводов устройствами СЦБ и пр. Эксплуатационные расходы будут связаны с содержанием нового путевого развития, содержанием штата

осмотрщиков вагонов, дополнительными пробегами поездных локомотивов при их смене, разницей в пробеге поездов.

В качестве примера в статье рассматриваются перспективы развития Комсомольского железнодорожного узла, для которого предлагаются следующие варианты альтернативных проектных решений его переустройства (рисунок):

$T_1P_0$  – развитие парка отправления (парк «В») ст. Комсомольск-Сортировочный, который в настоящее время обрабатывает транзитный поездопоток Ванинского и Ургальского направлений;

$T_1P_1$  – развитие р.п. Комсомольск-на-Амуре-2 и парка ст. Комсомольск-Сортировочный. По данному варианту развития предлагается поделить транзитные потоки, идущие с БАМа и Транссиба. Весь транзитный поездопоток с Бамовского направления, а он является преимущественным, предполагается обрабатывать на отдельном пункте Комсомольск-на-Амуре-2, который в настоящее время состоит из одного главного и трех приемоотправочных путей. Транзитный поездопоток с Транссибирской магистрали, как и прежде, будет обрабатываться в приемоотправочном парке станции Комсомольск-Сортировочный, при этом переустройства станции не потребуется;

$T_0P_1$  – весь транзитный поездопоток предлагается обрабатывать на базе парка «Новый Мир» станции Комсомольск-Сортировочный, который ранее был самостоятельным отдельным пунктом, а в настоящее время имеет один главный путь и два приемоотправочных.

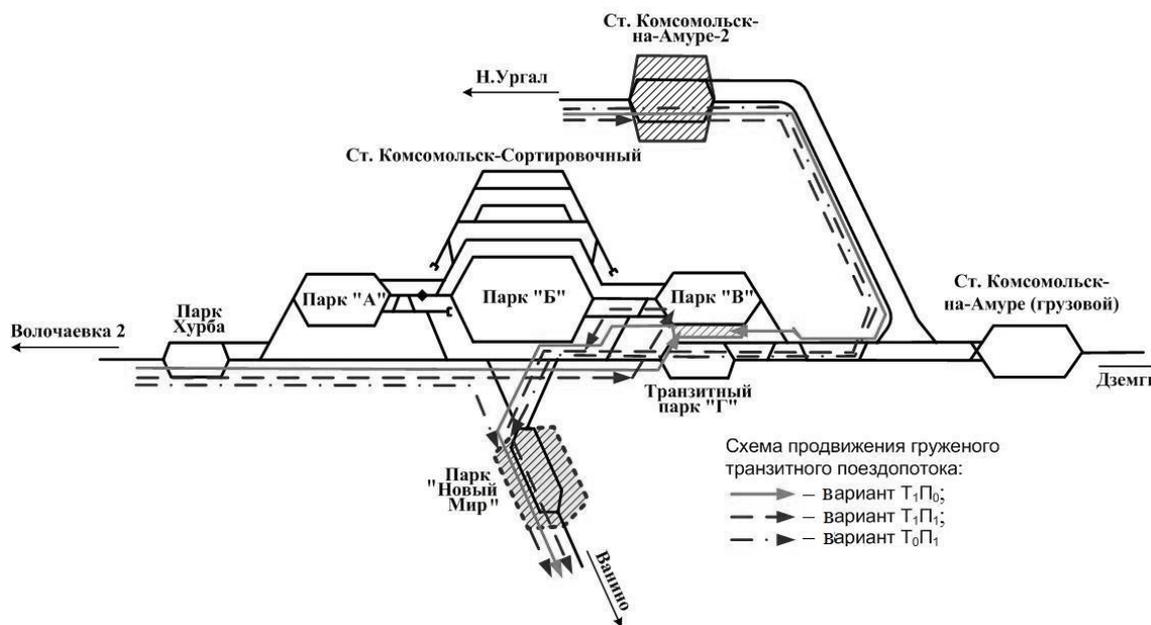


Схема развития Комсомольского железнодорожного узла

Предварительные проработки проектных решений показали, что освоение полного объема перспективных транзитных перевозок при развитии узла по варианту  $T_1P_0$  невозможно из-за отсутствия условий для обеспечения максимальных размеров движения потребным путевым развитием. Сопоставив приведенные затраты по вариантам  $T_0P_1$  и  $T_1P_1$ , можно будет сделать вывод об окончательном решении. При этом необходимо обеспечить соответствие проектного решения экологическим требованиям.

Выбор рационального варианта развития ТЖДУ с учетом экологических факторов осуществляется с учетом дополнительных условий, связанных с охраной окружающей природной среды. Для этого требуются капитальные затраты, которые представляют собой единовременные расходы, определяемые совокупностью мероприятий по сохранению природной среды, и являются частью общих инвестиционных вложений в проект строительства или переустройства станций.

Минимизация негативных воздействий на компоненты природной среды достигается путем разработки инженерно-планировочных мероприятий, которые включают в себя комплекс следующих решений:

- рационального использования земель;
- устройства санитарных разрывов между станцией и жилой застройкой;
- формирования общей системы биологических и механических экранирующих защитных устройств;
- озеленения территорий станций;
- строительства очистных сооружений поверхностного водостока со всей территории станционной площадки.

В связи с этим возникают капитальные затраты, которые связаны с внедрением мероприятий, предохраняющих окружающую среду в пределах железнодорожных станций от негативных воздействий шума, загрязнений поверхностного стока, распространения загрязняющих веществ в воздухе, нерационального изъятия земель под строительство или развитие станционных объектов. Кроме этого появляются текущие расходы природоохранного назначения, т. е. затраты на содержание и обслуживание защитных устройств.

Включение затрат на природоохранные мероприятия в расчеты приведенных расходов по проекту может повлиять на окончательный выбор проектного решения. В качестве эколого-экономического критерия авторами предлагается использовать аналог приведенных затрат – совокупность затрат на реализацию природоохранных мероприятий с учетом причиняемого ущерба компонентам окружающей среды:

$$\sum \mathcal{E}_{\text{пр}i}^{\text{эк}} = \sum \left( \sum_{t=0}^{T_{\text{пл}}} K_{ii}^{\text{эк}} \alpha_t + \sum_{t=0}^{T_{\text{пл}}} C_{ii}^{\text{эк}} \alpha_t + \sum_{t=0}^{T_{\text{пл}}} Y_{ii}^{\text{эк}} \alpha_t \right), \quad (5)$$

где  $K_{ii}^{\text{эк}}$  и  $C_{ii}^{\text{эк}}$  – инвестиционные вложения и эксплуатационные расходы на природоохранные мероприятия  $i$ -го вида в год  $t$ ;  $Y_{ii}^{\text{эк}}$  – ущерб, наносимый  $i$ -му виду компонентов окружающей среды после реализации природоохранных мероприятий.

Тогда выбор окончательного варианта проектного решения будет основываться на критерии, отражающем технико-, эколого-экономические показатели проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} + \sum \mathcal{E}_{\text{пр}i}^{\text{эк}} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Таким образом, можно сделать выводы о том, что для вариантного развития ТЖДУ и выбора проектного решения необходимо

- рассматривать транзитный узел как систему взаимодействия основной технической станции и близлежащих к ней малых отдельных пунктов;
- разрабатывать варианты развития узла с учетом возможного выноса всей или части транзитной работы на малые отдельные пункты;
- производить выбор проектного решения на основании критерия приведенных расходов;
- включать в состав приведенных расходов затраты на природоохранные мероприятия.

### Список литературы

1. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм [Текст]. – М.: Техинформ, 2001. – 255 с.
2. Волков, Б. А. Экономическая эффективность инвестиций на железнодорожном транспорте в условиях рынка / Б. А. Волков. – М.: Транспорт, 1996. – 192 с.

### References

1. *Pravila i tehničke norme projektovanja stanacija i uzlova na zheleznih dorogah kolei 1520 mm* (Rules and technical standards of design stations and junctions on the railways of 1520 mm). Moscow: Tekhinform Publ., 2001, 255 p.

2. Volkov B. A. *Jekonomicheskaja jeffektivnost' investicij na zheleznodorozhnom trans-porte v uslovijah rynka* (Cost-effective investment in rail transport in the marketplace). Moscow: Transport Publ., 1996, 192 p.

УДК 629.4

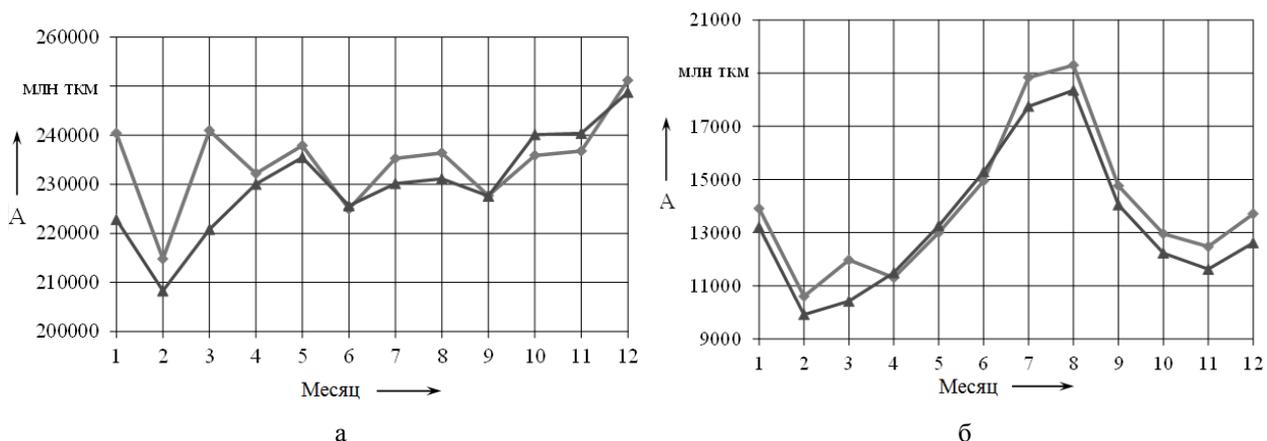
Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов, С. О. Вялкова

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОЧНОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ

*В статье предложена методология прогнозирования объемов перевозочной работы на железнодорожном транспорте на основе построения временных трендов.*

Надежное функционирование железнодорожного транспорта невозможно без эффективного управления материальными и топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР), для обеспечения которого необходимы объективные, научно обоснованные планирование и прогнозирование выполнения эксплуатационных показателей. Одним из важнейших таких показателей является объем перевозочной работы.

По заказу ОАО «Российские железные дороги» на кафедре «Информатика, прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения выполнены исследования динамики изменения объемов перевозочной работы в разных видах движения на полигонах электрической и дизельной тяги на всех железных дорогах Российской Федерации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характерной особенностью рассматриваемого показателя в поездных видах движения является цикличность его изменения по годам, а в пассажирском и пригородном видах движения наблюдается явно выраженная сезонность. В качестве примера на рисунке представлена динамика изменения объемов перевозочной работы в грузовом и пассажирском видах движения на сети железных дорог за 2012 – 2013 гг. Исключение составляет изменение объемов перевозочной работы в хозяйственном движении, которое часто носит случайный характер.



Динамика изменения объемов перевозочной работы на сети железных дорог:  
а – грузовое движение; б – пассажирское (—●— 2012; -▲- 2013)

На основе установленных статистических закономерностей предложена единая методология прогнозирования объемов перевозочной работы в грузовом, пассажирском, пригородном и хозяйственном видах движения, а также общего условного пробега на маневровой работе на различных уровнях организационной структуры ОАО «РЖД». Данная методология является составной частью разработанной методики анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов, которая готовится к внедрению на сети железных дорог.

На первом этапе решения поставленной задачи был выполнен сравнительный анализ существующих методов прогнозирования с целью определения возможности их применения с учетом специфики изменения рассматриваемого показателя.

Самыми распространенными и наиболее разработанными среди методов прогнозирования являются экстраполяционные методы. Они применяются тогда, когда динамика показателей в перспективе определяется тенденциями их изменения в прошедшем периоде [1]. Основным недостатком экстраполяционных методов является то, что тенденции и соотношения, которые распространяются на будущий период, должны уже существовать.

Регрессионные методы основаны на анализе и использовании устойчивых статистических связей между совокупностью переменных-аргументов и прогнозируемой переменной-функцией. Недостаток этих методов заключается в том, что для оценки значения прогнозируемого показателя необходимо определить прогнозные значения факторов-аргументов. При этом следует учитывать, что задача прогнозирования предполагает использование регрессионной модели и для оценки значений прогнозируемого показателя вне диапазона фактических наблюдений, на основе которого оно получено, т. е. приходится выходить за рамки наблюдений и решать задачу экстраполяции. При этом близость прогнозного и фактического значений рассматриваемого показателя во многом зависит от точности прогнозирования факторов-аргументов и стабильности степени связи между зависимой и независимыми переменными, определяемой коэффициентами уравнения регрессии [2, 3].

Экспертные методы применяются в случае, когда отсутствует надлежащая теоретическая основа развития объекта. Данные методы имеют существенный недостаток, обусловленный субъективизмом мнений экспертов и ограниченностью их суждений [1].

Нейросетевой подход к прогнозированию основан на построении достаточно сложной математической модели типа «черный ящик», сформированной по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей, и ее программной или аппаратной реализации. Среди недостатков нейросетевых методов необходимо выделить следующие: непрозрачность формирования результатов расчета прогнозных значений, необходимость обучения нейронной сети, высокую сложность внутренней структуры сети, невозможность задания новых правил формирования сети. Кроме того, существенным недостатком нейросетевого метода является зависимость прогноза от начальных установок сети и исходных данных, используемых для обучения нейронной сети [4, 5].

Нейронечеткие системы представляют собой многослойную нейронную сеть специальной структуры без обратных связей, в которой используются обычные (не нечеткие) сигналы, веса и функции активации [6, 7]. Одним из основных недостатков нейронечетких систем является наличие алгоритмов обратного распространения ошибки, которые заключаются в том, что во многих случаях для сходимости может потребоваться многократное (сотни раз) предъявление всей обучающей выборки данных.

Анализ специфики решаемой задачи позволил сформировать перечень критериев к выбору метода прогнозирования, которые заключаются в следующем:

- 1) при разработке модели прогноза участие эксперта должно быть сведено к минимуму;
- 2) метод прогнозирования должен иметь возможность работать с зашумленными данными;
- 3) процесс расчета прогнозных значений должен быть понятен специалисту, использующему метод;
- 4) сложность и время реализации должны быть минимальными, метод должен быть легко автоматизируемым;
- 5) метод должен поддерживать возможность корректировки модели для учета дополнительного набора факторов, оказывающих воздействие на систему.

Рассмотренные методы и их соответствие указанным критериям приведены в таблице 1, данные которой свидетельствуют о том, что наиболее подходящими для решения поставленной задачи являются экстраполяционные методы.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа методов прогнозирования

Метод прогнозирования	Номер критерия				
	1	2	3	4	5
Экстраполяционный	–	+	+	+	+
Регрессионный	–	–	+	+	+
Экспертный	–	–	+	–	–
Нейронные сети	+	–	–	–	+
Нейронечеткие системы	+	+	–	–	+

На основе выполненного исследования предложено прогнозирование объемов перевозочной работы в грузовом, пассажирском, пригородном и хозяйственном видах движения, а также условного пробега на маневровой работе осуществлять с помощью метода экстраполяции временных рядов, который заключается в распространении тенденций, установленных в прошлом, на будущий период. Под временным рядом понимаются данные, последовательно измеренные через некоторые (обычно равные) промежутки времени. Основная тенденция изменения значений временного ряда называется временным трендом (далее – тренд) [8].

Особенности предложенного метода прогнозирования объемов перевозочной работы на основе построения трендов их изменения представлены ниже. При этом возможные периоды прогнозирования (месяц, квартал, год и нарастающим итогом с начала года) обусловлены принятой в ОАО «РЖД» системой статистической отчетности. Прогнозирование выполняется при условии, что от начала прогнозного периода прошло: при прогнозировании на месяц – не менее 15 дней, на квартал – не менее двух месяцев, на год – не менее шести месяцев (далее – прошедшая часть прогнозного периода).

*Построение тренда изменения объемов перевозочной работы.* Построение тренда объемов перевозочной работы в каждом виде движения основано на выполнении ретроспективного анализа динамики их изменения по единицам времени, составляющим прогнозный период. Если длительность прогнозного периода не превышает одного месяца, то единицей времени являются сутки, в остальных случаях – месяц.

Определение тренда осуществляется отдельно для каждого вида тяги, в каждом виде движения на основе данных об объемах выполненной работы за базисный период. По сложившейся в ОАО «РЖД» практике в качестве базисного выбирается аналогичный прогнозируемому прошлый календарный период. В базисный период обязательно включаются соответствующие данные за год, предшествующий прогнозируемому. Для повышения достоверности прогнозирования в базисный период рекомендуется включать несколько прошлых однотипных периодов, аналогичных прогнозируемому (например, при прогнозировании объема перевозочной работы на январь в базисный период включаются данные за январь нескольких предыдущих лет). Количество однотипных периодов должно быть не менее трех. Максимальная длительность базисного периода составляет пять лет.

При построении тренда данные о выполненных объемах перевозочной работы за одинаковые единицы времени (например, за одинаковый день или месяц разных лет) в наборах данных за однотипные периоды, аналогичные прогнозируемому периоду (далее – однотипный набор данных), осредняются согласно порядку, приведенному ниже. В этом случае данные в базисном периоде за каждую единицу времени представляют собой соответствующие средние значения объемов перевозочной работы из однотипных наборов данных.

Построение тренда выполняется на основе расчета индексов сезонности изменения объемов перевозочной работы по единицам времени (далее – индекс сезонности). Определение индексов сезонности выполняется поэтапно по данным за базисный период путем заполнения таблицы по форме таблицы 2.

На первом этапе в таблицу 2 по строкам заносятся порядковый номер единицы времени;

суммарные данные о выполненной работе по соответствующей единице времени в соответствующем однотипном наборе данных;

по строке «Среднее значение» – данные о средних значениях объема перевозочной работы в соответствующем однотипном наборе данных, 10 тыс. ткм брутто, которые определяются по формуле:

$$\bar{A}_j = \frac{\sum_i A_{ij}}{m}, \quad (1)$$

где  $A_{ij}$  – объем перевозочной работы за  $i$ -ю единицу времени в  $j$ -м однотипном наборе данных, 10 тыс. ткм брутто;

$m$  – количество единиц времени в базисном периоде.

Таблица 2 – Форма таблицы для определения индексов сезонности изменения объемов работы

Единицы времени	Объем перевозочной работы в базисном периоде, 10 тыс. ткм брутто			Индекс сезонности изменения объема перевозочной работы в базисном периоде, %			Коэффициент вариации, %		Осредненный объем перевозочной работы, 10 тыс. ткм брутто	Индекс сезонности для прогнозирования, %
	Набор 1	...	Набор $n$	Набор 1	...	Набор $n$	первоначальный	итоговый		
	2	3	4	5	6	7				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1										
2										
...										
$m$										
Среднее значение				X	X	X	X	X		X

На втором этапе рассчитываются индексы сезонности изменения объемов перевозочной работы по соответствующей единице времени в рассматриваемом однотипном наборе данных по формуле [9]:

$$S_{ij} = \frac{A_{ij}}{\bar{A}_j} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $\bar{A}_j$  – среднее значение объема перевозочной работы в  $j$ -м однотипном наборе данных, 10 тыс. ткм брутто.

В случае, если в базисном периоде всего один однотипный набор данных, заполнение таблицы 2 прекращается. Рассчитанные индексы сезонности представляют собой тренд изменения объемов перевозочной работы, который используется для ее прогнозирования.

На третьем этапе производится оценка колеблемости индексов сезонности по каждой  $i$ -й единице времени в однотипных наборах данных. Этот и последующие этапы выполняются только в том случае, если количество однотипных наборов данных (значений объема перевозочной работы за  $i$ -ю единицу времени) не менее двух.

Колеблемость индексов сезонности характеризуется коэффициентом вариации, который определяется в процентах по формуле [10]:

$$v_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_j (S_{ij} - \bar{S}_i)^2}{n_i - 1}}}{\bar{S}_i} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $S_{ij}$  – индекс сезонности за  $i$ -ю единицу времени в  $j$ -м однотипном наборе данных, %;

$n_i$  – количество значений индексов сезонности за  $i$ -ю единицу времени;

$\bar{S}_i$  – среднее значение индекса сезонности за  $i$ -ю единицу времени, %, которое определяется по формуле:

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_j S_{ij}}{n_i}. \quad (4)$$

Рассчитанные по формуле (3) значения коэффициентов вариации индексов сезонности заносятся в графу (8) таблицы 2 в строки по соответствующим единицам времени.

Если количество однотипных наборов данных в базисном периоде больше двух, то выполняется сравнение коэффициента вариации по  $i$ -й единице времени с критическим значением  $v_{\max}$ , которое устанавливается на соответствующем уровне управления ОАО «РЖД» (рекомендуемое значение  $v_{\max}$  составляет 5%). Если  $v_i > v_{\max}$ , это свидетельствует о существенной колеблемости объемов перевозочной работы за  $i$ -ю единицу времени в однотипных периодах. В этом случае следует выполнить детальный анализ динамики изменения объемов перевозочной работы с контролем соответствующего изменения энергопотребления с целью выявления и дальнейшего исключения из всех значений работы  $A_{ij}$  за  $i$ -ю единицу времени в однотипных наборах данных значения работы, нарушающего сложившуюся тенденцию. В большинстве случаев такому значению работы соответствует индекс сезонности  $S_{ij}$ , наиболее отличающийся от среднего значения индекса сезонности за  $i$ -ю единицу времени  $\bar{S}_i$ . После этого коэффициент вариации индексов сезонности для  $i$ -й единицы времени определяется заново по формуле (3). Такой процесс повторяется циклически до тех пор, пока не будет выполняться условие  $v_i \leq v_{\max}$  либо пока в строке по  $i$ -й единице времени не останется всего одно значение работы.

Коэффициенты вариации, рассчитанные с учетом исключенных значений объема перевозочной работы, заносятся в графу (9) таблицы 2 в строки по соответствующим единицам времени.

На четвертом этапе рассчитываются данные о средних объемах перевозочной работы без учета исключенных на третьем этапе ее значений (далее – осредненный объем перевозочной работы). Осредненный объем перевозочной работы, 10 тыс. ткм брутто, определяется по формуле:

$$A'_i = \frac{\sum_j A_{ij}}{n_i}, \quad (5)$$

где  $n_i$  – количество значений работы за  $i$ -ю единицу времени.

Значение осредненного объема перевозочной работы за единицу времени базисного периода, 10 тыс. ткм брутто, рассчитывается по формуле:

$$\bar{A}' = \frac{\sum_i A'_i}{m}, \quad (6)$$

где  $m$  – количество единиц времени в базисном периоде.

На заключительном этапе рассчитываются индексы сезонности изменения осредненных объемов перевозочной работы по соответствующим единицам времени по формуле:

$$S'_i = \frac{A'_i}{\bar{A}'} \cdot 100. \quad (7)$$

Полученные значения заносятся в последнюю графу таблицы 2 и представляют собой тренд изменения объемов перевозочной работы, на основе которого осуществляется ее прогнозирование.

*Прогнозирование объема перевозочной работы на основе тренда.* Необходимым условием для прогнозирования объема перевозочной работы на основе тренда является наличие фактических значений объемов перевозочной работы за каждую единицу времени прошедшей части прогнозного и аналогичной ей части базисного периодов. Вид (сутки или месяц) и количество единиц времени в базисном и прогножном периодах должны быть одинаковыми.

На первом этапе процедуры прогнозирования по данным таблицы 2 определяется в безразмерных единицах коэффициент ритмичности выполнения перевозочной работы в базисном периоде по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^k S'_i}{\sum_{i=1}^m S'_i}, \quad (8)$$

где  $S'_i$  – индекс сезонности изменения осредненного объема работы за  $i$ -ю единицу времени базисного периода, %;

$k$  – количество единиц времени в части базисного периода, аналогичной прошедшей части прогнозного периода.

Прогнозное значение объема перевозочной работы на прогнозный период в целом, 10 тыс. ткм брутто, рассчитывается по формуле.

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^k A_{i,ч,п}}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где  $A_{i,ч,п}$  – фактическое значение работы за  $i$ -ю единицу времени прошедшей части прогнозного периода, 10 тыс. ткм брутто;

$k$  – количество единиц времени в прошедшей части прогнозного периода;

$\varepsilon$  – коэффициент ритмичности работы в базисном периоде.

Затем на основе полученного тренда определяются прогнозные значения объема перевозочной работы, 10 тыс. ткм брутто, на каждую  $i$ -ю единицу времени оставшейся части прогнозного периода по формуле:

$$\tilde{A}_i = \frac{\tilde{A}}{m} \frac{S'_i}{100}, \quad (10)$$

где  $\tilde{A}$  – прогножное значение работы на прогнозный период в целом, 10 тыс. ткм брутто.

Прогножное значение объема перевозочной работы в целом по структурному подразделению определяется суммированием прогнозных значений объемов работы в грузовом, пассажирском, пригородном и хозяйственном видах движения, которые рассчитываются по единой методологии, представленной выше.

Таблица 3 – Расхождение прогнозных и фактических значений объемов работы по железным дорогам

Железная дорога	Расхождение прогнозного и фактического значений работы, %
Октябрьская	1,04
Калининградская	-1,98
Московская	-3,19
Горьковская	-1,92
Северная	2,63
Северо-Кавказская	-1,10
Юго-Восточная	-3,54
Приволжская	3,57
Куйбышевская	-2,42
Свердловская	0,03
Южно-Уральская	-4,53
Западно-Сибирская	-1,64
Красноярская	-1,69
Восточно-Сибирская	-1,57
Забайкальская	-2,02
Дальневосточная	-1,82
Всего по сети	-1,51

С целью апробации предложенной методологии прогнозирования объемов перевозочной работы проведены соответствующие расчеты во всех видах движения на всех видах тяги по всем железным дорогам Российской Федерации по данным за 2013 г. Для оценки точности прогнозирования предложенным методом выполнены расчеты расхождения фактических отчетных данных об объемах перевозочной работы и соответствующих прогнозных значений. В качестве примера в таблицах 3 и 4 приведены результаты таких расчетов для каждой железной дороги и по видам движения в целом по сети дорог.

Таблица 4 – Расхождение прогнозных и фактических значений объемов работы по видам движения в целом по сети железных дорог

Вид движения	Расхождение прогноз-ного и фактического значений работы, %
Грузовое	-1,78
Пассажирское	1,90
Пригородное	-1,12
Хозяйственное	7,14
Маневровая работа	-0,66
Всего по сети	-1,51

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что предложенная методология позволяет с достаточно высокой точностью определять прогнозные значения объемов перевозочной работы на основе сложившихся статистических закономерностей ее изменения.

### Список литературы

1. Прогнозирование и планирование в условиях рынка: Учебное пособие [Текст] / Под ред. Т. Г. Морозовой, А. В. Пикулькина. – М.: Юнити-Дана, 2003. – 279 с.
2. Стрижов, В. В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей [Текст] / В. В. Стрижов / ВЦ РАН. – М., 2008. – 61 с.
3. Стрижов, В. В. Методы выбора регрессионных моделей [Текст] / В. В. Стрижов, Е. А. Крымова / ВЦ РАН. – М., 2010. – 60.
4. Хинтон, Д. Е. Как обучаются нейронные сети [Текст] / Д. Е. Хинтон // В мире науки. – М. – 1992. – № 11-12. – С. 103 – 107.
5. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / О. Сосновский; Пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
6. Модель прогнозирования нагрузки электроэнергетической системы на основе нейронечеткого подхода [Текст] / Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько и др. // Известия Санкт-Петербургского гос. электротехнического ун-та «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. Сер. Автоматизация и управление / Санкт-Петербургский гос. электротехнический ун-т «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. – СПб., 2004. – Вып. 1. – С. 42 – 47.
7. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 736.
8. Годин, А. М. Статистика: Учебник [Текст] / А. М. Годин. – М., 2012. – 452 с.
9. Халафян, А. А. Статистический анализ данных: Учебник [Текст] / А. А. Халафян. – М.: Бином, 2010. – 522 с.
10. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник [Текст] / В. Н. Афанасьев, М. М. Юзбашев. – М.: Инфра-М, 2010. – 319 с.

### References

1. Morozova T. G. *Prognozirovanie i planirovanie v usloviakh rynka: uchebnoe posobie dlia vuzov* (Forecasting and planning in market conditions: a textbook for high schools). Moscow, 2003, 279 p.
2. Strizhov V. V. *Metody induktivnogo porozhdeniia regressionnykh modelei* (Inductive methods of generating regression models). Moscow, 2008, 61 p.

3. Strizhov V. V., Krymova E. A. *Metody vybora regressionnykh modelei* (Methods for selecting regression models). Moscow, 2010, 60 p.
4. Geoffrey E. Hinton. How neural networks learn from experience [Kak obuchaiutsia neironnye seti]. *V mire nauki – In the world of science*, 1992, no 11 – 12, pp. 103 – 107.
5. Osovskii S. *Neironnye seti dlia obrabotki informatsii* (Neural Networks for processing the information). Moscow, 2002, 344 p.
6. Poliakhov N. D., Prihod'ko I. A., Poliakhov D. N., Anushina E. S. Model forecasting of power system load based on neuro-fuzzy approach [Model prognozirovaniia nagruzki elektroenergeticheskoi sistemy na osnove neuro-nechetkogo podkhoda]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta «LETI» im. V.I. Ul'ianova – Proceedings of the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after VI Ulyanov*, 2004, no. 1, pp. 42 – 47.
7. Leonenkov A. V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH). St. Petersburg, 2005, 736 p.
8. Godin A. M. *Statistika* (Statistics). Moscow, 2012, 452 p.
9. Khalafian A. A. *Statisticheskii analiz dannykh* (Statistical analysis of the data). Moscow, 2007, 522 p.
10. Afanas'ev V. N., Iuzbashev M. M. *Analiz vremennykh riadov i prognozirovanie* (Time Series Analysis and Forecasting). Moscow: INFRA-M, 2010, 319 p.

УДК 629.424.3:621.436.03.001.42

## ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРОЙ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ДЛЯ МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ

**Блинов Павел Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, декан теплоэнергетического факультета, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

**Блинов Александр Павлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: blinovap@mail.ru

*В статье рассматривается расчет влияния параметров топливной аппаратуры дизелей на характер изменения и величину подачи топлива при впрыске. Представлена реализация математической модели процесса топливоподачи, которую необходимо использовать при формировании комплектов перед их установкой на дизель и для расчета параметров деталей, используемых при обкатке топливных насосов высокого давления на стендах с целью приближения условий работы на стенде к реальным условиям работы на дизеле и правильного определения производительности насосов на стенде.*

Ключевые слова: *дизели, топливная аппаратура, топливный насос высокого давления, нагнетательный трубопровод, форсунка, производительность насоса, впрыск топлива, модель процесса топливоподачи, стенды.*

## REALIZATION OF MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS VALVES, FUEL EQUIPMENT OF DIESEL LOCOMOTIVE ENGINES FOR MULTIPLE ACCOUNTS

**Blinov Pavel Nikolayevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior scientific employee, the senior lecturer, the dean of faculty «Heat power», OSTU.

Phone: (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

**Blinov Alexander Pavlovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

E-mail: blinovap@mail.ru

*The article describes the calculation of parameters of diesel fuel equipment on the nature of the change and the amount of fuel injection. Provides an implementation of the mathematical model of the fuel to be used when the kits before you install them on diesel and for calculation of parameters of parts used in the high pressure fuel pumps running on stands with a view to approximating the conditions of work in the booth to real conditions of a diesel engine and determine the correct performance of the pumps at the stand.*

**Keywords:** *diesels, fuel equipment, fuel high-pressure pump, pressure line, sprayer, the pump capacity, fuel injection, the model of the process of fuel feed, stands.*

УДК 62.752, 621.8.02

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА**

**Елисеев Сергей Викторович**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор, директор научно-образовательного центра «Современные технологии, системный анализ и моделирование», ИрГУПС.

Тел.: (3952) 59-84-28.

E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

**Артюнин Анатолий Иванович**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор, первый проректор ИрГУПС.

Тел.: (3952) 59-84-26.

E-mail: artyunin\_ai@irgups.ru

**Каимов Евгений Витальевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Младший научный сотрудник научно-образовательного центра «Современные технологии, системный анализ и моделирование», ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-26.

*Предлагается метод построения математических моделей механических колебательных систем, включающих в свой состав механизмы с кинематическими парами скольжения. Показано, что введение механизмов может быть интерпретировано как введение в исходную модель дополнительных обратных связей, соответствующих в целом управлению по абсолютному ускорению и по абсолютному отклонению. Основой предлагаемой технологии построения математических моделей являются представления о том, что при наличии механизма или механической цепи иного вида силовые и кинематические возмущения формируют различные структуры динамических взаимодействий. Получены аналитические соотношения, определяющие динамические свойства систем. Рассмотрены особенности динамических свойств, проявляющиеся в различных формах динамических взаимодействий и частотных характеристик.*

Ключевые слова: колебания механизмов, механические цепи, динамическое гашение колебаний, передаточные функции механических колебательных систем, дополнительные обратные связи.

## THEORETICAL BASES OF THE DYNAMIC INTERACTIONS IN OSCILLATORY SYSTEMS WITH KINEMATIC COUPLES OF THE FORWARD TYPE

### **Eliseev Sergei Victorovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.

Doc. Sci. Tech., the full professor, director of scientific-educational center «Modern technology, system analysis and modeling», ISTU.

Phone: (3952) 59-84-28.

E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

### **Artyunin Anatoly Ivanovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.

Doc. Sci. Tech., the first prorector of ISTU.

Phone: (3952) 59-84-26.

E-mail: artyunin\_ai@irgups.ru

### **Kaimov Eugene Vitalyevich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.

Junior researcher of scientific-educational center «Modern technology, system analysis and modeling», ISTU.

Phone: (3952) 59-84-28.

E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

*The method of creation of mathematical models of the mechanical oscillatory systems which are turning on in the structure mechanisms with kinematic couples of slippage is offered. It is shown that introduction of mechanisms can be interpreted as introduction to initial model of the additional feedback, in general, to steering on absolute speedup and on an absolute deviation. A basis of the offered technology of creation of mathematical models are representations that in the presence of the mechanism or a mechanical chain of other look power and kinematic indignations form various structures of dynamic interactions. The analytical ratios defining dynamic properties of systems are received. The features of dynamic properties which are shown in various forms of dynamic interactions and frequency characteristics are considered.*

Keywords: oscillations of mechanisms, mechanical chains, dynamic blanking out of oscillations, transfer functions of mechanical oscillatory systems, additional feedback.

УДК 536.255

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

### **Кондратенко Евгений Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: evgenkond@mail.ru

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований по оценке возможности использования тепловых методов контроля герметичности котла железнодорожной цистерны. В данной работе отражены результаты исследования формирования тепловых полей на внешней поверхности резервуара в области сквозного дефекта типа трещина при дросселировании сквозь него газовой среды за счет перепада давления.*

*Полученные термограммы отражают локализацию дефекта с подробным описанием аномалий тепловых полей, зафиксированных тепловизором. Также практически подтверждены опыты, описанные в работах Джоуля и Томсона, по дросселированию газа сквозь местное препятствие.*

Ключевые слова: *тепловой контроль, термограмма, эффект Джоуля – Томсона, дросселирование.*

## EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING THERMAL METHOD FOR LEAKAGE TESTING OF THE BOILER OF A RAILROAD TANK CAR

**Kondratenko Evgenij Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Wagons and wagon farm», OSTU.

E-mail: evgenkond@mail.ru

*The article presents the results of experimental studies to assess the possibility of using thermal methods of controlling the leakage of the boiler of a railroad tank car. This paper reflects the research of formation of the thermal field on the outer surface of the tank in the area of end-to-end defect such as a crack, by throttling through the gas medium due to the pressure differential.*

*Presented thermograms show the localization of the defect with a detailed description of the anomalies of the thermal fields, recorded by the imager. Also confirmed the experiments described in the work on Joule and Thomson for throttling gas through local obstacle.*

Keywords: *thermal control, thermograms, the Joule-Thomson throttling.*

УДК 625.1

## НОВАЯ ПАРАДИГМА КИНЕМАТИКИ «КОЛЕСО – РЕЛЬС»

**Новачук Ярослав Антонович**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

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

E-mail: novachuk@inbox.ru

Тел.: (4212) 40-75-81.

**Никитин Дмитрий Николаевич**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: rain238@yandex.ru

Тел.: (4212) 40-76-89.

**Коблов Роман Викторович**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Старший преподаватель кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: romashka.one2007@rambler.ru

Тел.: (4212) 40-75-81.

**Тепляков Алексей Николаевич**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

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

E-mail: talnik@festu.khv.ru

Тел.: (4212) 40-77-37.

*Предметом исследований является определение и обоснование математических характеристик движения железнодорожного колеса, адекватно отражающих механизм его взаимодействия с рельсом.*

*Целью работы является адаптация фундаментальных положений циклоидальных кривых, отражающих движение круга, к движению условных точек топологических кругов сечения бандажа железнодорожного колеса, имеющего сложный профиль.*

*Методология работы построена на изучении и систематизации фундаментальных исследований в области геометрии, математики и механики идеализированного движения круга, в основу которого положены математические свойства циклоидальных кривых. Приведена модель движения колеса железнодорожной колесной пары (с неподвижными колесами на оси), в основу которой положены кинематические и механические свойства голономных систем. В соответствии с общими голономными, фундаментальными математическими свойствами системы установлены аналитические зависимости и соотношения кинематических параметров поступательной скорости подвижного состава и скорости взаимодействия колес с рельсами, которые позволяют дополнять методологию тяговых расчетов в России и в других странах. В настоящее время в отечественной практике используют десятки различных формул, в которые включена составляющая линейной скорости движения, а не скорость взаимодействия колес с рельсами с учетом их физических и геометрических параметров. Линейная (поступательная) скорость движения колеса недостаточно точно отражает механизм взаимодействия колес подвижного состава с рельсами.*

*Фундаментальная теория циклоидальных кривых дает возможность обоснованно аналитически нормировать скорость движения подвижного состава различных типов, его проектировщикам и создателям априори формировать конструкционные и технико-экономические характеристики, гарантирующие надежность, долговечность и эффективность работы оборудования экипажной части, снижая риск безопасности движения поездов.*

*Ключевые слова: кинематика топологического круга, рельс, скорость взаимодействия, колесо, бандаж.*

## NEW PARADIGM OF KINEMATICS «THE WHEEL – THE RAIL»

### **Novachuk Yaroslav Antonovich**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: novachuk@inbox.ru

Phone: (4212) 40-75-81.

### **Nikitin Dmitry Nikolaevich**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

The senior teacher of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: rain238@yandex.ru

Phone: (4212) 40-76-89.

### **Koblov Roman Viktorovich**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

The senior teacher of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: romashka.one2007@rambler.ru

Phone: (4212) 40-75-81.

### **Tepljakov Alexey Nikolaevich**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: talnik@festu.khv.ru

Phone: (4212) 40-77-37.

*Subject of researches is determination and the justification of mathematical characteristics of motion of a railway wheel adequately reflecting the gear of its interaction with a rail.*

*The activity purpose is adaptation of fundamental positions of the cycloidal curves reflecting motion of a circle to motion of conditional points of topological circles of section of a shroud of a railway wheel, having a difficult structure.*

*The activity methodology is constructed on study and systematisation of fundamental investigations in the field of geometry, mathematics and mechanics of idealised motion of a circle in which basis mathematical properties of cycloidal curves are put. The model of motion of a wheel of a railway mounted axle (with immovable wheels on an axis) in which basis are put kinematic and mechanical properties gonomnykh systems is fetched. Following general gonomnykh, fundamental mathematical properties of system, analytical relations and ratio of kinematic parametres of a forward speed of railway vehicles and speed of interaction of wheels with rails which allow to supplement methodology of thrust calculations at us and in other countries are installed. By the current moment time in domestic practice use tens various formulas which actuate a component of linear speed of motion, instead of speed of interaction of wheels with rails, taking into account their physical and geometric parametres. Linear (translational) speed of motion of a wheel not absolutely adequately reflects the gear of interaction of wheels of railway vehicles with rails.*

*The fundamental theory of cycloidal curves gives the chance is proved to normalise analytical speed motion of railway vehicles of various types, to designers and founders it a priori form*

*constructional and technology - economic characteristics warranting reliability, life and overall performance of the equipment dolly parts, reducing risk of a traffic security of trains.*

Keywords: *kinematics of a topological circle, rail, speed of interaction, wheel, shroud.*

УДК 629.424:621.001.5

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В МОТОРНОМ МАСЛЕ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ Д49**

**Овчаренко Сергей Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Локомотивы», ректор ОмГУПСа.

Тел.: (3812) 31-34-17.

**Минаков Виталий Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

*Процесс эксплуатации тепловозного дизеля связан с постепенным износом деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Периодическая безразборная оценка степени изношенности деталей этих групп возможна при применении метода, основанного на анализе контроля текущих значений концентрации продуктов износа. Одной из основных задач при реализации этого метода является задача оценки количества металла, изношенного с контролируемых деталей, по результатам анализа текущих значений концентрации продуктов износа. В статье приведены методика расчета и результаты моделирования работы системы очистки моторного масла дизеля типа Д49.*

Ключевые слова: *тепловозный дизель, цилиндропоршневая группа, кривошипно-шатунный механизм, диагностирование дизеля, фильтрация моторного масла, спектральный анализ моторного масла.*

## **MODELING ACCUMULATION OF PRODUCTS DEPRECIATION IN ENGINE OIL OF DIESEL D49**

**Ovcharenko Sergey Mikhailovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., head of the department «Locomotives», rector of OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

**Minakov Vitaliy Anatolievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

*Process operating diesel locomotive associated with the gradual deterioration of parts of the cylinder-piston and crank mechanism. Periodic assessment without taking for the pieces of these groups is possible when using a method based on an analysis of the current values of the control concentration of wear. One of the main problems in the implementation of this method is the problem of estimating the amount of metal worn with controlled parts on the analysis of the current values of the concentration of wear. The article describes the method of calculation and simulation results of the system clean engine oil diesel D49.*

Keywords: *diesel, cylinder-piston group, crank rod mechanism, diagnosing of diesel, engine oil filtering, spectral analysis of engine oil.*

УДК 629.424.001.57

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЯХ**

### **Сковородников Евгений Иванович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-34-17, (3812) 68-45-08.

E-mail: skov1945@mail.ru

### **Анисимов Александр Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-34-17.

### **Гришина Юлия Борисовна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.

E-mail: gubuly@mail.ru

*Основным направлением снижения эксплуатационных расходов на тягу поездов является уменьшение затрат на топливно-энергетические ресурсы, снижение ремонтных расходов за счет повышения показателей эксплуатационной надежности энергетических установок дизельного подвижного состава. Очевидно, что решение этих проблем в настоящее время, когда эксплуатационная экономичность дизелей и их надежность находятся на пределе для сложившихся условий эксплуатации и производства дизельных локомотивов, возможно за счет применения альтернативных видов топлива, использование которых позволит повысить как надежность дизельного подвижного состава, так и его экономичность в условиях эксплуатации. Одним из таких альтернативных видов топлива может быть либо природный газ, либо бытовой нефтяной газ, т. е. смесь бутана и пропана в различных соотношениях. В настоящей статье на базе математических моделей показана возможная экологическая и экономическая эффективность использования смесевых видов топлива на примере тепловозного дизеля 2А-5Д49.*

Ключевые слова: *тепловозный дизель 2А-5Д49, виды углеводородного топлива, эффективность применения для тяги.*

## FEASIBILITY STUDY ON APPLICATION SMESSEVS OF TYPES OF FUEL IN DIESEL DIESELS

### **Skovorodnikov Evgenie Ivanovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17, (3812) 68-45-08.

E-mail: skov1945@mail.ru

### **Anisimov Alexander Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

### **Grishina Julia Borisovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Safety of vital activity and ecology», OSTU.

E-mail: gubuly@mail.ru

*The main direction of decrease in operational costs on draft of trains is reduction of expenses by fuel and energy resources, decrease in repair expenses at the expense of increase of indicators of operational reliability of power installations of a diesel rolling stock. It is obvious that the solution of these problems, now when operational profitability of diesels and their reliability are on a limit for the developed service conditions and production of diesel locomotives, it is possible at the expense of application of alternative types of the fuel which use will allow to raise both reliability of a diesel rolling stock, and its profitability under operating conditions. One of such alternative fuels can, is either natural gas, or household oil gas, that is a butane and propane mix in various ratios. In the present article on the basis of mathematical models possible ecological and economic efficiency of use of mix types of fuel on the example of the diesel 2A – 5D49 is shown.*

Keywords: *the diesel 2A – 5D49, types of hydrocarbonic fuel, efficiency of application for draft.*

УДК 621.313

## ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

### **Харламов Виктор Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

**Шкодун Павел Константинович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

**Долгова Анна Владимировна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

**Хлопцов Андрей Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (381-2) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

*В статье приведены результаты термографических исследований процесса нагревания деталей коллекторно-щеточного узла (КЩУ) электрических машин постоянного тока. Обоснованы диагностические параметры для оценки технического состояния КЩУ ТЭД: отношение изменения превышения температуры во времени и в пространстве.*

Ключевые слова: *тяговый двигатель, термографические исследования, температура, коллекторно-щеточный узел, диагностирование.*

## THERMOGRAPHIC STUDY OF COLLECTOR-BRUSH ASSEMBLY TRACTION MOTORS OF ROLLING STOCK

**Harlamov Victor Vasilevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, head of the department «Electrical machines and common electro-technic», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

**Shkodun Pavel Konstantinovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

**Dolgova Anna Vladimirovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

**Hloptsov Andrej Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post graduate student of the department «Electrical machines and common electrotechnic», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

*The results of infrared studies of the process of heating parts collector and brush assembly dc electrical machines. Proved diagnostic parameters for assessing the technical condition of the collector-brush assembly of electric motors: the ratio of changes in the elevation of temperature in time and space.*

Keywords: *traction motor, thermographic studies, temperature, collector and brush assembly, diagnosis.*

УДК 621.335.11

## ИЗМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ВЛ85 НА ВЫСШИХ ЗОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Бакланов Александр Алексеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@yandex.ru

**Есин Николай Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: NikVE@mail.ru

**Гателюк Олег Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-16-88.

*В статье предлагается изменение алгоритма работы плеч выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза ВЛ85 с целью индивидуального регулирования напряжения на тяговых двигателях при сохранении единой централизованной системы управления всеми преобразователями электровоза. Предложенные решения могут быть применены для ликвидации начавшегося боксования колесных пар локомотива без снижения силы тяги небоксующих колесных пар.*

Ключевые слова: *электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, алгоритм управления силовыми тиристорами, тяговый двигатель, индивидуальное регулирование напряжения, прекращение боксования.*

## ALTERATION THE ALGORITHM OF THE RECTIFIER-INVERTER CONVERTER FOR ELECTRIC LOCOMOTIVE VL85 AT THE HIGHER AREAS OF REGULATION

### **Baklanov Alexander Alekseevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@yandex.ru

### **Esin Nikolai Vasilyevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: NikVE@mail.ru

### **Gatlyuk Oleg Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lector of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: (3812) 31-16-88.

*In the article suggests a changing the algorithm of the rectifier-inverter converter electric locomotive VL85. This will allow the individually to regulate voltage on traction engines. In this case will preserve a single centralized system of control of all electric converters. The proposed solutions may be used for liquidation started spinning of wheel locomotive. Tractive force the remaining wheelsets will not decrease.*

Keywords: *alternating current locomotive, rectifier-inverter converter, the control algorithm of the power thyristors, driving motor, individual voltage control, termination spinning of wheel.*

УДК 621.311.1

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Вильгельм Александр Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

**Комяков Александр Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

**Незевак Владислав Леонидович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

*Совершенствование методов электрических расчетов в общем случае направлено на повышение точности получаемых результатов. Одним из направлений совершенствования методов расчета является учет в расчетах различных факторов, оказывающих влияние на точность расчета параметров системы тягового электроснабжения. В настоящей статье рассмотрен подход, направленный на совершенствование метода электрического расчета в части повышения точности путем изменения алгоритма расчета и учета ряда дополнительных факторов.*

Ключевые слова: *система тягового электроснабжения, напряжение на токоприемнике, коэффициент реактивной мощности, матричный метод расчета, электроподвижной состав.*

## IMPROVEMENT IN THE CALCULATION METHODS FOR THE TRACTION POWER SYSTEM

**Vilgelm Alexander Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the research engineer of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

**Комыakov Alexandr Anatolievich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the deptment «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

**Nezevak Vladislav Leonidovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor, senior research associate of research-and-production laboratory «Power saving up technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

*In general, improvement of methods for electrical calculations aimed at increasing the accuracy of the results. One of the ways to improve the methods of calculation is the account in the calculation of the various factors that affect the accuracy of calculation of the traction power system parameters. This article describes an approach aimed at improving the method of calculation in the electrical part to improve the accuracy by changing the algorithm for calculating and accounting for a number of additional factors.*

Keywords: *traction power system, the voltage at the pantograph, power factor, matrix method, electric rolling stock*

УДК 621.331

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

**Закарюкин Василий Пантелеймонович**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-45.

E-mail: zakar49@mail.ru

**Крюков Андрей Васильевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, член-корреспондент АН ВШ РФ, заслуженный энергетик РБ, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-45.

E-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Черепанов Александр Валерьевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Аспирант, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-45.

E-mail: santela89@mail.ru

*Рассмотрены вопросы применения технологий интеллектуальных сетей (smart grid) для управления качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. Описана структура интеллектуальной системы тягового электроснабжения. Дана классификация технических средств управления режимами системы тягового электроснабжения и качеством электроэнергии. Предложен алгоритм моделирования режимов интеллектуальных электроэнергетических систем, питающих электротяговые нагрузки, отличающийся тем, что в его основу положено совместное использование имитационных и динамических моделей активных элементов smart grid. Результаты моделирования подтверждают применимость разработанных методов для решения задач управления качеством электроэнергии.*

Ключевые слова: интеллектуальные системы тягового электроснабжения, управление качеством электроэнергии.

## **ELECTRIC POWER QUALITY MANAGEMENT IN TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS ON THE SMART GRID BASIS**

**Zakaryukin Vasilij Panteleymonovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of ISTU.

Phone: (3952) 63-83-45.

E-mail: zakar49@mail.ru

**Kryukov Andrey Vasilievich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of ISTU, academician of the Russian academy of transport, Ass. member of High school academy of science.

Phone: (3952) 63-83-45.

E-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Cherepanov Aleksandr Valerevich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia.

Post-graduate student of ISTU.

Phone: (3952) 63-83-45.

E-mail: santela89@mail.ru.

*Application intellectual networks (smart grid) technologies for electric power quality manage-*

*ment in systems of alternating current railroads' power supply are considered. The structure of intellectual traction power supply system is described. Classification of management technical means for electric power modes and quality is given. The algorithm of intellectual electrical power traction systems modes' modeling is offered. This algorithm differs by sharing of imitating and dynamic models of the active smart grid elements in its basis. The modeling results confirm applicability of the developed methods for the solution of electric power quality management's problems.*

Keywords: *intellectual systems of traction power supply, quality management of the electric power.*

УДК 621.331:621.311

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И МОЩНОСТИ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРАФИКАМИ НАГРУЗОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

**Москалев Юрий Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru

*В статье рассмотрен способ управления графиками электрических нагрузок железнодорожных потребителей с использованием накопителей энергии. Рассмотрены различные типы накопителей энергии, используемые на железнодорожном транспорте. Выполнена постановка оптимизационной задачи, выбраны критерии и метод для ее решения. В качестве оптимизационного метода использован метод Хука – Дживса. Предложен способ для определения оптимальных параметров и оптимального закона управления зарядом и разрядом стационарного накопителя энергии. Приведены критерии и расчетные выражения, которые могут быть использованы при проектировании и технико-экономическом обосновании эффективности внедрения стационарного накопителя энергии для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей. Предложено математическое выражение для определения энергоемкости накопителя по известному закону изменения его мощности. Приведены результаты решения оптимизационной задачи для двух критериев – минимума потерь активной мощности и минимума приведенных затрат, выполнено сравнение результатов. Для количественной оценки изменения графика электрических нагрузок использованы коэффициенты формы и максимума. Указано на возможность управления графиком реактивной мощности в электрической сети переменного тока с использованием полупроводниковых преобразователей и накопителя энергии. Рассмотрен вариант по использованию литий-титанатного химического источника тока в качестве накопителя энергии для железнодорожных потребителей. В результате оптимального управления графиками электрических нагрузок будет получен технический и экономический эффект.*

Ключевые слова: *накопитель энергии, железнодорожные потребители электроэнергии, коэффициент формы.*

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF ENERGY STORAGE DEVICES TO MANAGE RAILWAY'S ELECTRICAL LOADS

**Moskalev Yuriy Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone.: (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru

*The article describes a method for controlling electrical loads rail consumers using energy storage. Different types of energy storage devices used in rail transport were considered. Performed the optimization problem formulation, selected criteria and the method for its solution. As an optimization method used the method of Hooke-Jeeves. A method is proposed to determine the optimal parameters and the optimal control law of charging and discharging of the energy storage. The criteria and calculation expressions that can be used in the design and feasibility study of the effectiveness of implementation of the stationary energy storage for managing schedules loads rail consumers. The mathematical expression was proposed for the energy storage capacity determination. Two criteria were considered in the optimization problem: a minimum active power losses and minimum reduced costs, and a comparison of results. The form factor used to evaluate the changes in electrical loads. Control of reactive power in the AC mains can realize using semiconductor converters and an energy storage. As a variant the electrochemical cells (lithium-titanate batteries) could be used as energy storage for rail electric consumers. As a result, optimal control of electrical loads allows to get technical and economic effects.*

Keywords: energy storage, electrical loads of railway, form factor.

УДК 62-83: 621.311.001: 629.423.32

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫВОДОМ В СРЕДНЕЙ ТОЧКЕ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Пустоветов Михаил Юрьевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, директор НИИЦа «Криотрансэнерго», РГУПС.

E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Тел.: (863) 245-37-47.

*Однофазный трансформатор с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки является весьма распространенным элементом в составе различных электрических схем, в том числе на борту электроподвижного состава. Типовым случаем является питание от такого трансформатора двухполупериодной нулевой схемы выпрямления. Целью работы является подробное описание разработанной автором компьютерной модели упомянутого трансформатора, построенной на основе сочетания схемотехнического и опера-*

ционного принципов составления. Предложенная модель может быть использована также для анализа процессов в однофазном двухобмоточном трансформаторе без отпайки с учетом возможных групп соединения I/I-6 или I/I-0. Группа соединения может быть учтена индивидуально для каждой половины вторичной обмотки при использовании отпайки. Показан пример встраивания модели трансформатора в более сложную компьютерную модель системы стабилизации тока возбуждения тяговых электродвигателей электровоза постоянного тока, в состав которой входит компьютерная модель насыщающегося дросселя, тиристорного выпрямителя, системы импульсно-фазового управления выпрямителем и замкнутой системы автоматического управления с пропорционально-интегральным регулятором тока и форсирующей нелинейностью. Полученные в ходе моделирования графики тока возбуждения в обмотке возбуждения коллекторного тягового электродвигателя и его реактивной составляющей показывают, что рассмотренная система стабилизации тока и ее компьютерная модель работоспособны и успешно выполняют возложенные на них функции: при спаде тока якоря ток возбуждения поддерживается за счет увеличения тока подпитки от выпрямителя управления возбуждением. Констатируются корректная работа и удобство использования разработанной компьютерной модели однофазного трансформатора с дополнительным выводом (отпайкой) в средней точке вторичной обмотки.

Ключевые слова: электровоз постоянного тока, коллекторный тяговый электродвигатель, выпрямитель, обмотка возбуждения, однофазный трансформатор, компьютерная модель, стабилизация тока.

#### USAGE OF 1-PHASE TRANSFORMER WITH ADDITIONAL TAP AT MEDIUM POINT OF SECONDARY WINDING SIMULATOR FOR SYSTEM OF TRACTION MOTOR EXCITATION CURRENT STABILIZATION INVESTIGATION

**Pustovetov Michail Yurievich**

Rostov State Transport University (RSTU).

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

Ph. D., associate professor, director in Science-Investigation and Test Center «Cryotransenergo», RSTU.

E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Phone: (863) 245-37-47.

*Single-phase transformer with an additional tap at the middle point of the secondary winding is a very common element in the various electrical circuits, including on-board electric rolling stock. A typical case is powered from the transformer zero full-wave rectification circuit. The aim of the article is to provide a detailed description of the computer model developed by the author of said transformer, built on the basis of a combination of circuit and operational design principles. The proposed model can also be used to describe the process in a single-phase two-winding transformer without additional tap, given the possible connection group I / I-6 or I / I-0. Connection groups can be considered individually for each half of the secondary winding in case of using of additional tap. Shows an example of embedding the transformer model in a more complex computer model of the electric traction DC motors excitation current stabilization system, which includes a computer model of a saturable reactor, thyristor rectifier, system of pulse-phase rectifier control and control loop with a proportional-integral current regulator and boost nonlinearity. Obtained during the simulation graphics excitation current in the field winding of collector traction motor and its reactive component show that the above system of stabilization of the current and its computer model of*

*functional and successfully fulfill their functions: at the downturn of the armature current excitation current is maintained by the growth of the current make-up of excitation control rectifier. The correct operation and ease of use of the developed computer model of a single-phase transformer with an additional tap at the middle point of the secondary winding is stated.*

Keywords: DC electric locomotive, DC traction motor, rectifier, excitation winding, 1-phase transformer, simulator, stabilization of current.

УДК 621.331:621.311

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ОАО «РЖД»**

### **Черемисин Василий Титович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, зав. кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Тел.: (3812) 31-34-19.

### **Пашков Денис Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

E-mail: denispashkov@mail.ru

Тел.: (3812) 31-06-88.

### **Ушаков Сергей Юрьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЧ, ОмГУПС.

E-mail: ushakovsj@gmail.com

Тел.: (3812) 44-39-23.

*Наличие постоянно меняющейся электротяговой нагрузки, распределенной не только по времени, но и в пространстве приводит к сложности детального мониторинга энергетической эффективности организации движения поездов ОАО «РЖД». Поэтому одной из первоочередных задач энергетической стратегии ОАО «РЖД» является внедрение инновационных технических средств и технологий. В работе рассмотрены основные положения и некоторые функциональные возможности создаваемого автоматизированного информационно-измерительного комплекса учета электрической энергии на электроподвижном составе.*

Ключевые слова: электрическая энергия, автоматизация мониторинга и учета, энергетическая эффективность.

## **AUTOMATED MONITORING OF ENERGY EFFICIENCY OPERATION OF THE ELECTRIC ROLLING STOCK OF JSC «RUSSIAN RAILWAYS»**

### **Cheremisin Vasilii Titovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, director of energy research Institute of railway transport, head of department «Rolling stock electric railways», OSTU.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Phone: (3812) 31-34-19.

### **Pashkov Denis Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

E-mail: denispashkov@mail.ru

Phone: (3812) 31-06-88.

### **Ushakov Sergey Yurjevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior researcher, OSTU.

E-mail: ushakovsj@gmail.com

Phone: (3812) 44-39-23.

*The presence of ever-changing electrical traction load, distributed not only in time but also in space leads to the complexity of the detailed monitoring of the energy efficiency of the organization trains JSC «Russian Railways». Therefore one of the priorities of the energy strategy of JSC «Russian Railways» is the introduction of innovative technical tools and technologies. The paper discusses the main provisions and some functionality created automated information-measuring complex accounting of electric energy in the electric rolling stock. Reviewed the processing of data for evaluation of energy efficiency of trains on the basis of the developed system.*

Keywords: *electric energy, automation, monitoring and accounting, energy efficiency.*

УДК 004.056

## **АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ДОСТУПА БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ WI-FI, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

### **Морозов Антон Валерьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

E-mail: morozav89@mail.ru

Тел.: (3812) 31-05-89.

## **Шахов Владимир Григорьевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса 35.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

*В статье авторы проводят анализ информационной безопасности современной технологии беспроводного взаимодействия компьютерных сетей Wi-Fi. Проведен анализ международных провайдеров и статистики нарушений для нескольких основных стандартов безопасности и сделаны выводы по безопасности сетей Wi-Fi. Даны основные рекомендации развертывания Wi-Fi-сетей для объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.*

Ключевые слова: *информационная безопасность, провайдер, ключ, формат кадра, стандарт.*

## **ANALYSIS OF SECURITY ACCESS WIRELESS TECHNOLOGY WI – FI, USED IN RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES**

### **Morozov Anton Valeryevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Automatics and control systems», OSTU.

E-mail: morozav89@mail.ru

Phone: (3812) 31-05-89.

### **Shakhov Vladimir Grigoryevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., professor of the department «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

*The authors analyze the information security of modern technology of computer networks wireless communication. The analysis of international providers and statistics for multiple violations of the basic standards of safety and conclusions on their safety. Key recommendations are deploying Wi-Fi networks for infrastructure of railway transport.*

Keywords: *information security, provider, key, frame format, standard.*

УДК 656.222.3

## **МОДЕЛЬ ГРУППИРОВКИ ОБЪЕКТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

### **Белов Александр Анатольевич**

Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого.

142210, Московская область, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17.

Кандидат технических наук, начальник кафедры «Эксплуатация ракетных комплексов».

E-mail: belloww@rambler.ru

**Ларин Андрей Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

*В статье решается задача оптимального подбора объектов подвижного состава внутри групп по критерию минимума суммы квадратов отклонений текущих значений заданного показателя от оценки его математического ожидания для объектов группы. Решение задачи получено на основе методов, базирующихся на идеях целочисленного программирования, использующих булевы переменные и понятия тесноты связи между объектами и между группами объектов.*

Ключевые слова: *группировка объектов, формирование составов, вагон, минимизация суммы квадратов отклонения, количество объектов в группе.*

## MODEL GROUP FEATURES ROLLING STOCK

**Belov Aleksandr Anatolyevich**

Military Academy of strategic missile forces named after Peter the Great.

17, Ulya, Moscow region, Serpukhov, 142210, Russia.

Ph. D., head of the department «Operation of rocket complexes».

E-mail: belloww@rambler.ru

**Larin Andrey Nikolaevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., associate professor of the department «Economics of transport, logistics and quality management» (OSTU).

Tel.: (3812) 31-06-48.

E-mail: larinan75@mail.ru

*The article solves the problem of optimal selection of rolling stock within groups according to the criterion of minimum sum of squared deviations of the current values of a given metric on the evaluation of their mathematical expectations for group objects. The solution obtained on the basis of methods based on ideas integer programming using Boolean variables and concepts of the relation between objects and between groups of objects.*

Keywords: *grouping objects, formation of the staff, wagon, minimizing the sum of squared deviations, the number of objects in a group.*

УДК 656.259.12:621.372.5: 517.54

## НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ КООРДИНАТЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТЦЕПОВ В ПОДГОРОЧНЫХ ПАРКАХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК

**Лунев Сергей Александрович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», первый проректор, проректор по учебной работе, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-72.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

### **Сероштанов Сергей Сергеевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-18-72.

E-mail: SeroshtanovSS@omgups.ru

### **Соколов Максим Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

*В статье рассматриваются вопросы определения координаты подвижного состава на участке железнодорожного пути. Предложено и обосновано применение математического аппарата конформных отображений. Показаны результаты экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *рельсовая линия, координата подвижной единицы, конформное отображение.*

## **CONTINUOUS MONITORING OF COORDINATES ROLLING STOCK ON THE RAILWAY TRACK OF HUMP YARD**

### **Lunev Sergey Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Automatics and telemechanics», first Vice-rector, Vice-rector on educational work, OSTU.

Phone: (3812) 31-18-72.

E-mail: LunevSA@omgups.ru

### **Seroshtanov Sergey Sergeevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-72.

E-mail: SeroshtanovSS@omgups.ru

### **Sokolov Maxim Mihaylovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the teacher of the department «Automatics and telemechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-72.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

*This paper deals with the determination of the coordinates of the rolling stock for the railway station. Proposed and justified the use of mathematical tools of conformal mappings. The results of the experiment are shown.*

Keywords: rail line, the coordinate rolling stock, conformal mapping.

УДК 656.212.2.073.22

## **О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И СТОИМОСТЬ ПЕРЕВОЗКИ**

**Псеровская Елена Дмитриевна**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

E-mail: pserovskaya@stu.ru

**Хорунжин Сергей Юрьевич**

ОАО «РЖД».

630110, г. Новосибирск, ул. 25 лет Октября, 14, кв. 201.

Инженер ОАО «РЖД».

E-mail: khorunhinsu@mail.ru

Тел.: (383) 229-49-34.

*Размещение и крепление грузов при их перевозке назначением на станции железных дорог Российской Федерации производятся согласно положениям Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах ЦМ-943 (ТУ) [1]. Требования отдельных пунктов ТУ влияют не только на безопасность движения поездов, но и на стоимость перевозки и, как следствие, – на прибыль ОАО «РЖД».*

Ключевые слова: размещение грузов на вагоне, смещение центра масс, негабаритный, безопасность движения, сохранность деталей подвижного состава, стоимость перевозки.

## **ABOUT INFLUENCE OF CONDITIONS FREIGHT PLACEMENT ON TRAFFIC SAFETY OF TRAINS AND TRANSPORTATION COST**

**Pserovskaya Elena Dmitrievna**

Siberian State Transport University (SSTU).

191, st. D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russia.

Ph. D., associate professor, head of the department «Logistics, someone-profit work and rolling stock», SSTU.

E-mail: pserovskaya@stu.ru

**Horunzhin Sergey Yuryevich**

JSC «Russian Railways».

14, st. 25 years on October, r. 201, Novosibirsk, 630110, Russia.

Engineer of JSC «Russian Railways».

E-mail: khorunhinsu@mail.ru

Phone: 8 (383) 229-49-34.

*Placement and fastening of freights, at their transportation by appointment to stations of the railroads Russian Federations, is made according to provisions of Specifications of placement and fastening of freights in cars and containers TsM – 943 (TU). Requirements of the TU separate points influence not only traffic safety of trains, but also the cost of transportation and as a result – JSC «RZD».*

*Keywords: placement of freights on the car, shift of the center of masses, not carriage, traffic safety, safety of details of a rolling stock, transportation cost.*

УДК 656.212.078(571.6)

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ТРАНЗИТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

**Червотенко Елена Эдуардовна**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», член-корреспондент Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ).

E-mail: elena\_chervotenko@mail.ru

Тел.: 8 (4212) 40-70-55.

**Калинина Анна Робертовна**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Старший преподаватель кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

E-mail: hell.k@mail.ru

Тел.: 8 (4212) 40-70-61.

*Приоритетным направлением экономического развития Дальнего Востока является его ориентация на связи со странами АТР. Через регион проходят крупнейшие железнодорожные магистрали – Транссибирская и Байкало-Амурская, имеющие выход к дальневосточным портам, что способствует росту объемов внешнеторговых операций и увеличению транзитного грузопотока в регионе. Расширение транспортно-экономических связей нашей страны на Дальнем Востоке, реализация ряда программ добывающей отрасли в зоне БАМа, осуществление проектов по развитию морских портов Дальнего Востока приведет к возникновению повышенных нагрузок на железнодорожную инфраструктуру региона. Важную роль в процессе перевозок играют технические станции, на которых обрабатывается весь транзитный поездопоток, поэтому на современном этапе актуальным является рассмот-*

рение аспектов выбора рационального варианта развития транзитных железнодорожных узлов с учетом экологических факторов.

Ключевые слова: *Дальний Восток, железнодорожная инфраструктура, технические станции, транзитный поездопоток, экологические факторы, варианты развития*

## PECULIARITIES OF THE TECHNICAL RAILWAY STATIONS' DEVELOPMENT WITHIN THE TRANSIT TRANSPORT NODES OF THE FAR EAST REGION

**Chervotenko Elena Eduardovna**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Seryshev Str., Khabarovsk, 680021, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Technology of transport processes and logistics»,

Corresponding member of International academy of ecology and life protection sciences (IAELPS).

E-mail: elena\_chervotenko@mail.ru

Phone: 8 (4212) 40-70-55.

**Kalinina Anna Robertovna**

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Seryshev Str., Khabarovsk, 680021, Russia.

Senior lecturer of the department «Technology of transport processes and logistics», FESTU.

E-mail: hell.k@mail.ru

Phone: 8 (4212) 40-70-61.

*One of the priority areas of economic development of the Far East Region is focused on the communications with the countries of the Asia-Pacific Region. The region is crossed by the largest railways, such as Trans-Sib and Baikal-Amur, which have an access to the Far East seaports that promotes the growth of international trade operations and the increase of the transit traffic in the region. An expansion of transport and economic relations of our country in the Far East Region, the implementation of a considerable number of extractive industry programs within Baikal-Amur Region, the development of the sea ports of the Far East Region will cause the growth of the workload on the rail infrastructure that is impossible without its development and modernization. An important role in the transport process belongs to the technical stations, which handle all transit trains traffic. Therefore, at the current state, the consideration of the aspects of choosing the rational variants of railway transit nodes' development with allowance for the environmental factors is timely.*

Keywords: *Far East Region, the railway infrastructure, technical railway stations, transit trains traffic, environmental factors, and development's options.*

УДК 629.4

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОЧНОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ

**Сидорова Елена Анатольевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

### **Давыдов Алексей Игоревич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-66.

E-mail: davydovai@bk.ru

### **Вялкова Светлана Олеговна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

*В статье предложена методология прогнозирования объемов перевозочной работы на железнодорожном транспорте на основе построения временных трендов.*

*Ключевые слова: объем перевозочной работы, прогнозирование, тренд, индекс сезонности, коэффициент вариации.*

## **METHODOLOGY FOR PREDICTING TRANSPORTATION WORK VOLUME BY CONSTRUCTING A TIME TREND**

### **Sidorova Elena Anatolievna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Tech. Sci., head of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

### **Davydov Alexei Igorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., the senior lecturer of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: davydovai@bk.ru

### **Vyalkova Svetlana Olegovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-66.

E-mail: ps.light@mail.ru

*The authors propose the methodology of transportation on railway transport forecasting based on the construction of temporal trends.*

*Keywords: the volume of transportation work, forecasting, trend, seasonality index, coefficient of variation.*

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia\_transsiba@mail.ru

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию журнала представляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова (5 – 10 слов), название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи);

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен 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.

англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации), содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье), «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редколлегия оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
2. Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
3. Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, ОмГТУ (Омск).
4. Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
5. Демин Юрий Васильевич – д.т.н., профессор, НГАВТ (Новосибирск).
6. Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., доцент, ВНИИЖТ (Москва).
7. Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
8. Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, НИЦ «Динамика» (Омск).
9. Кузнецов Андрей Альбертович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
10. Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
11. Медведев Владимир Ильич – д.т.н., профессор, СГУПС (Новосибирск).
12. Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
13. Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск).
14. Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
15. Николаев Виктор Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
16. Рауба Александр Александрович – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
17. Сафронов Эдуард Алексеевич – д.т.н., профессор, СибАДИ (Омск).
18. Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
19. Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
20. Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
21. Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., профессор, ОмГУПС (Омск).
22. Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., профессор, ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г. Свидетельство о регистрации – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia\_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.09.2014.

Тираж 500 экз.

EDITORIAL BOARD

1. Borodin Anatoly Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
2. Vedruchenko Viktor Rodionovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
3. Gorjunov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, OmSTU (Omsk).
4. Gonchar Igor Ivanovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
5. Demin Yury Vasilyevich – D. Sc., professor, NSAWT (Novosibirsk).
6. Ermolenko Dmitry Vladimirovich – D. Sc., associate professor, JSC «VNIIZhT» (Moscow).
7. Kandaev Vasily Andreevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
8. Kostjukov Vladimir Nikolaevich – D. Sc., professor, SPC «The dynamics» (Omsk).
9. Kuznetsov Andrey Albertovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
10. Lebedev Vitaly Matveevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
11. Medvedev Vladimir Ilyich – D. Sc., professor, SSTU (Novosibirsk).
12. Mitrokhin Valery Evgenyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
13. Mochalin Sergey Mikhailovich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk).
14. Nekhaev Viktor Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
15. Nikolaev Viktor Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
16. Rauba Alexander Alexandrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
17. Safronov Edward Alexeevich – D. Sc., professor, SibADI (Omsk).
18. Sidorov Oleg Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
19. Sidorova Elena Anatolyevna – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
20. Kharlamov Viktor Vasilyevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
21. Chetvergov Vitaly Alexeevich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).
22. Shpaltakov Vladimir Petrovich – D. Sc., professor, OSTU (Omsk).

