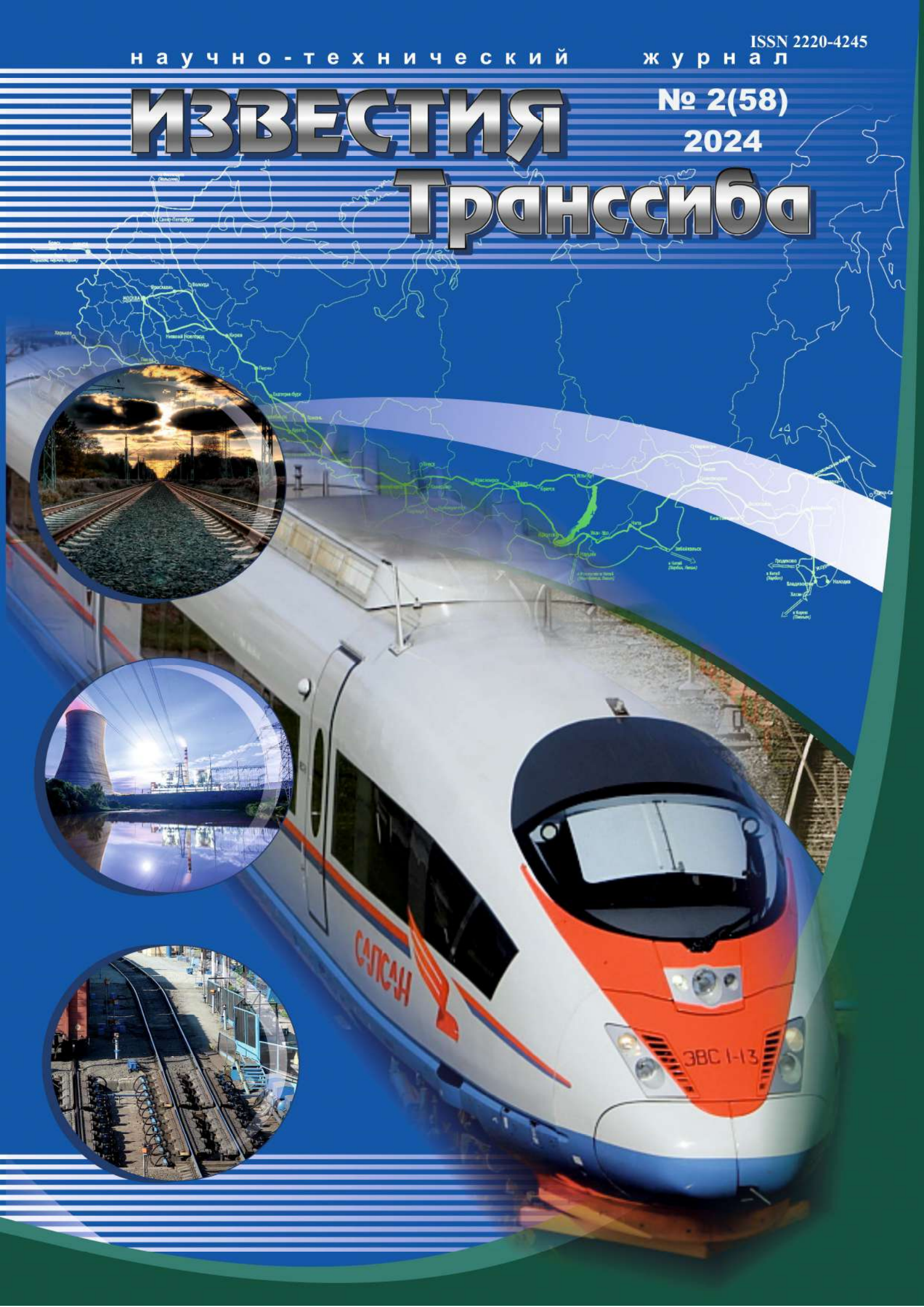


# ИЗВЕСТИЯ

№ 2(58)

2024

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. **Алексеев Виктор Михайлович** – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. **Бессоненко Сергей Анатольевич** – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. **Кузнецов Андрей Альбертович** – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. **Лебедев Виталий Матвеевич** – д.т.н., профессор (Омск).
17. **Никитин Александр Борисович** – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзинькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Жухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухамеджана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТРУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

## 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 advisor to the rector's office 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, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
  5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
  6. **Vedruchenko Victor Rodionovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  7. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
  8. **Goryunov Vladimir Nikolaevich** – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  9. **Huda Alexander Nikolaevich** – vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
  10. **Zykina Anna Vladimirovna** – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  11. **Isakov Alexander Leonidovich** – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
  12. **Kim Konstantin Konstantinovich** – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
  13. **Komyakov Aleksandr Anatol'evich** – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  14. **Kosarev Alexander Borisovich** – senior deputy of general director of JSC «VNIIT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
  15. **Kuznetsov Andrey Albertovich** – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  16. **Lebedev Vitaliy Matveyevich** – D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  17. **Nikitin Aleksandr Borisovich** – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
  18. **Livshits Alexandr Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
  19. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
  20. **Paramonov Aleksandr Mikhailovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  21. **Sidorov Oleg Alexeevich** – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
  22. **Smerdin Aleksandr Nikolaevich** – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  23. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Rolling stock» of ALT of Muxamedzhan Tyynyshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
  24. **Fayziybaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
  25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
- Иванченко Владимир Иванович** – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Ходкевич А. Г. Изменение условий электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с тяговой сетью переменного тока на участках бесстыкового пути..... 2
- Савоськин А. Н., Васильев А. П., Тимченко А. Ю. Сравнительный анализ показателей динамических качеств и диссипативных сил в гидравлических гасителях колебаний, включенных по типовой схеме и по схеме упругозащищенного гасителя для упрощенной одномассовой модели электровоза..... 9
- Чунин С. В., Гасюк А. С., Фазлиахметов Д. М., Муравлев Е. В., Лобачев О. А. К вопросу совершенствования методики оценки прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов по результатам стендовых испытаний ..... 17
- Лукьянова О. А., Гершман И. С., Миронов Н. В., Царьков А. А. Концепция разработки системы токосъема для высокоскоростных магистралей..... 24
- Сидоров О. А., Тарасов А. Н. Двухступенчатый токоприемник электроподвижного состава для высокоскоростных магистралей..... 36
- Бакланов А. А., Клюка В. П., Мосол С. А. Анализ причин схода подвижного состава с рельсов..... 49
- Кубкина О. В., Осипова А. И. Минимизация времени автоматического повторного включения..... 61

### Управление процессами перевозок

- Упырь Р. Ю., Дудакова А. В. Моделирование работы сервиса быстрого реагирования для обеспечения работы терминально-складских комплексов..... 72

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Сычева А. В., Локтев А. А., Сычев В. П. Снижение динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь применением новой технологии распределения балласта..... 82
- Богданов А. И., Квашук С. В. Динамика изменения геокриологических условий восточного подхода Северомуйского тоннеля..... 89

### Теоретическая и прикладная теплотехника

- Слободина Е. Н., Парамонов А. М., Степашкин И. А., Михайлов А. Г. Экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при использовании наножидкостей..... 100

### Энергетические системы и комплексы

- Полозкова А. П., Гаак В. К., Гусаров А. С. К вопросу определения тепловой эффективности плоских солнечных коллекторов..... 109
- Мятеж Т. В., Секретарев Ю. А., Мошкин Б. Н., Донченко С. С. Синергетическая модель учета экологического ущерба при оптимизации режимов работы гидроэлектростанций в составе водохозяйственного комплекса на основе критерия максимизации прибыли..... 119

### Электроэнергетика

- Есаулов А. В., Тигунцев С. Г., Анненков Е. О. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ при несинхронизированных замерах по концам перегона... 136

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Пультяков А. В., Скоробогатов М. Э., Алексеенко В. А., Кузин М. В. Преобразователь интерфейса классификатора веса для горочной автоматики..... 146

## Научно-технический журнал «Известия Транссиб / Journal of Transsib Railway Studies»

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»  
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

А. Г. Ходкевич

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

## ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ С ТЯГОВОЙ СЕТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА УЧАСТКАХ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

**Аннотация.** Целью работы является анализ изменения условий работы систем, смежных электрифицированным железным дорогам, при внедрении технологии бесстыкового пути. Задачами настоящего исследования являются: 1) доказательство наличия электрического влияния контактной сети на рельсы; 2) расчет уровня наведенного напряжения электрического влияния; 3) оценка возможности ухудшения электромагнитной обстановки систем, смежных электрифицированным железным дорогам, за счет электрического влияния. В статье использованы расчетно-аналитические методы исследования. В работе описана технология бесстыкового пути и произведена количественная оценка емкостной составляющей в сопротивлении «рельс – земля» на участках бесстыкового пути. Проведен анализ влияния емкостной составляющей сопротивления «рельс – земля» бесстыкового пути на условия электромагнитной совместимости железнодорожной автоматики и телемеханики с тяговой сетью переменного тока. Рассчитаны распределенные емкости между контактной сетью и рельсами своего и смежного пути для различных типов контактного провода. Доказано наличие электрического влияния. Выполнен расчет наведенных напряжений электрического влияния для разных типов контактного провода. Результаты расчета показали, что разница наведенных напряжений электрического влияния на ближний и дальний рельсы соседнего пути ухудшает установленные условия электромагнитной обстановки для системы автоматической локомотивной сигнализации. Научная новизна проводимых исследований заключается в доказательстве наличия электрического влияния на рельсы и, как следствие, на системы, использующие рельсы в качестве каналов передачи информации. Практическая значимость проведенных исследований заключается в описании еще одного источника мешающих воздействий для системы автоматической локомотивной сигнализации, что позволит искать эффективные пути решения проблемы сбоев кодов автоматической локомотивной сигнализации.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, электрическое влияние, тяговая сеть, бесстыковой путь.

Anton G. Khodkevich

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

## CHANGING THE CONDITIONS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RAILWAY AUTOMATION DEVICES WITH AC POWER SUPPLY ON SECTIONS OF A SEAMLESS TRACK

**Abstract.** The purpose of the work is to analyze changes in the operating conditions of systems adjacent to electrified railways when introducing the technology of a seamless track. The objectives of this study are: 1) proof of the electrical influence of the contact network on the rails; 2) calculation of the level of induced voltage of electrical influence; 3) assessment of the possibility of electrical influence to worsen the electromagnetic environment of systems adjacent to electrified railways. The article uses computational and analytical research methods. The paper describes the technology of a seamless track and quantifies the capacitive component in the rail – ground resistance in sections of a seamless track. The analysis of the influence of the capacitive component of the rail – ground resistance of a seamless track on the conditions of electromagnetic compatibility of railway automation and telemechanics with an alternating current traction network is carried out. The distributed capacities between the contact network and the rails of its own and adjacent tracks for various types of contact wire are calculated. The presence of an electrical influence has been proven. The calculation of induced voltages of electrical influence for different types of contact wire is performed. The calculation results showed that the difference in induced voltages of electrical influence on the near and far rails of the adjacent track worsens the established conditions of the electromagnetic environment for the automatic locomotive signaling system. The scientific novelty of the research is to prove the presence of electrical influence on rails and, as a result, on systems using rails as information transmission channels. The practical significance of the conducted research lies in the description of another source of interfering influences for the automatic locomotive signaling system, which will allow us to look for effective ways to solve the problem of failures of automatic locomotive signaling codes.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, electrical influence, traction system, seamless track.

Железнодорожный путь – это комплекс инженерных сооружений, предназначенных для пропуска по нему поездов с установленной скоростью. От состояния пути зависят непрерывность и безопасность движения поездов, но железнодорожный путь не единственный в решении этих задач. За бесперебойность движения отвечают также устройства тягового электроснабжения и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Железнодорожный путь является общим элементом для хозяйств пути, тяги и автоматики. Модернизация пути затрагивает все эти хозяйства [1]. Современная конструкция железнодорожного пути (бесстыковой путь) не только увеличивает электрическое сопротивление «рельс – земля», приводящее к росту амплитуды тягового тока, протекающего по рельсам [2], но и вносит емкостную составляющую в это сопротивление [1].

До внедрения бесстыкового пути тяговая рельсовая сеть представляла собой электрически непрерывный естественный заземлитель, обеспечивающий все требуемые параметры для электроустановок с большими токами замыкания на землю (сопротивление не более 0,5 Ом) [3]. На участках бесстыкового пути последнее требование не выполняется из-за высокого сопротивления перехода «рельс – земля».

Входное сопротивление такого заземлителя для непрерывной рельсовой сети рассчитывают по формуле [1]:

$$R = q \cdot \frac{\sqrt{r_p \cdot r_{p-z}}}{2}, \quad (1)$$

где  $q$  – импульсный коэффициент заземлителя в переходном режиме короткого замыкания тяговой сети на рельс ( $q = 1,5 - 2,0$ );

$r_p$  – продольное сопротивление рельсов, Ом/км;

$r_{p-z}$  – сопротивление изоляции рельсов от земли, Ом·км.

Для двухпутного участка бесстыкового пути при электротяге переменного тока минимальные  $r_p$  и  $r_{p-z}$  равны соответственно 0,77 Ом/км и 48 Ом·км. Тогда входное сопротивление рельсовой сети как заземлителя равно 4,56 Ом (при  $q = 1,5$ ), что в девять раз превышает норму 0,5 Ом [5].

Для участков с электротягой постоянного тока повышенное сопротивление перехода «рельс – земля» снижает гальваническое влияние тягового тока за счет снижения стекания тока в землю, а для участков при электротяге переменного тока возрастает величина тягового тока, протекающего в рельсах, что уже потребовало разработки дроссель-трансформаторов большей мощности ДТ-1МГ1-450П. Эти изменения – всего лишь малый аспект того, как изменение конструкции железнодорожного пути повлияло на работу смежных устройств. Автор предлагает рассмотреть вопрос: как изменились условия электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с тяговой сетью при внедрении бесстыкового пути.

По механизму передачи энергии различают следующие виды электромагнитных влияний: электрическое, магнитное и гальваническое.

Электрическое влияние проявляется за счет электрического поля влияющей линии или, по-другому, за счет емкостной связи между линиями (рисунок 1).

Контактную сеть (КС) и смежную линию (СЛ) можно рассматривать как обкладки конденсатора емкостью  $C_1 l$ , где  $C_1$  – емкость между СЛ и КС на 1 км длины системы,  $l$  – длина системы, км. Вместе со вторым конденсатором с обкладками СЛ – земля емкостью  $C_0 l$  – этот конденсатор образует емкостной делитель, определяющий напряжение электрического влияния на СЛ по формуле [2]:

$$U_э = U_K \frac{C_1 l}{C_1 l + C_0 l} = U_K \frac{C_1}{C_1 + C_0}, \quad (2)$$

где  $U_K$  – напряжение КС 27500 В;

$C_1$  – емкость между СЛ и КС на 1 км длины системы;

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$C_0$  – емкость между СЛ и землей;  
 $l$  – длина системы, км.

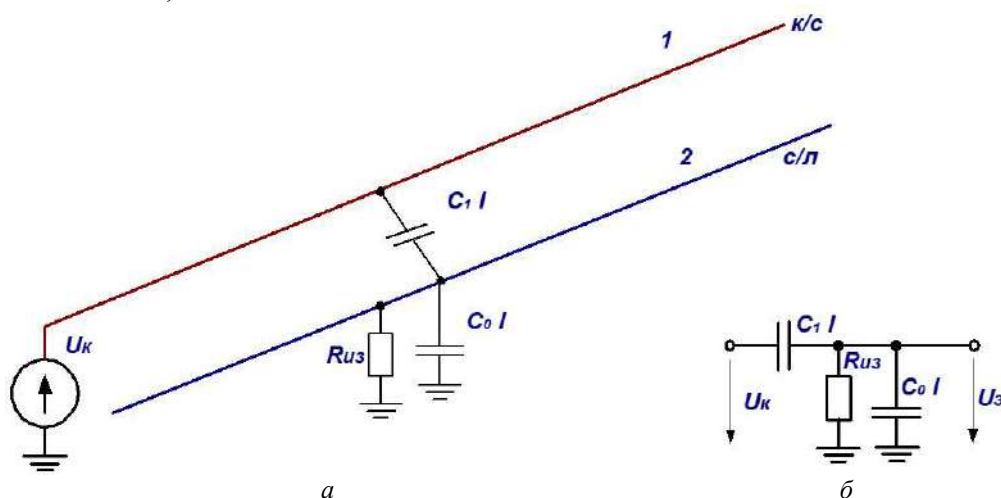


Рисунок 1 – Схема электрического влияния КС на СЛ:  
а – схема электрического влияния КС на СЛ; б – схема замещения электрического влияния

При этом видно, что если СЛ полностью лежит в зоне влияния КС, то длина системы  $l$  не имеет значения.

Принимая во внимание добавление емкостной составляющей в электрическое сопротивление «рельс – земля», в первую очередь нужно рассмотреть изменения в области электрического влияния. Первое и существенное изменение заключается в том, что рельсовая линия по отношению к КС приобретает свойства СЛ. На участках бесстыкового пути рельсы находятся под напряжением электрического влияния  $U_z$  даже в отсутствие поездов на междуподстанционной зоне. На двухпутных участках на рельсы наводится напряжение контактным проводом не только своего пути, но и смежного. Влияние своего контактного провода отличает его симметричное расположение относительно левого и правого рельсов. Влияние контактного провода смежного пути на левый и правый рельсы будет разным, как следствие, возникает разность напряжений между рельсами вызывающая протекание тока асимметрии и его влияние на рельсовые цепи. Стоит отметить также, что при проведении ремонта пути и пропуске поездов по одному из путей перегона рельсы отключенного пути остаются под напряжением электрического влияния смежного пути. Предлагается провести оценку величины  $U_z$ , для этого нужно сначала оценить емкость  $C_0$  – емкость между рельсами и землей.

Бесстыковой путь представляет собой цельносварные рельсы на железобетонных шпалах и новую конструкцию балластной призмы с использованием геотекстиля, пеноплекса и других изоляционных материалов. Технология требует укладки геотекстиля на 40 см ниже подошвы шпалы [6]. Общий вид балластной призмы представлен на рисунке 2.

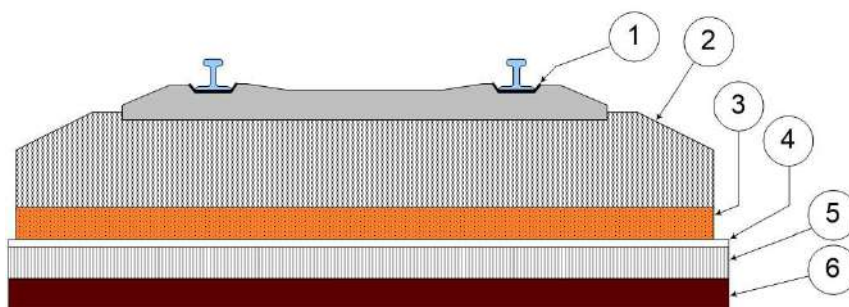


Рисунок 2 – Строение балластной призмы: 1 – резиновая прокладка; 2 – чистый щебеночный балласт; 3 – пеноплекс; 4 – геотекстиль; 5 – старый балластный слой; 6 – грунт земляного полотна

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В структуре балластной призмы можно выделить две емкости, соединенные последовательно – емкость, вносимая резиновой прокладкой, и емкость, вносимая двумя диэлектриками – пеноплексом и геотекстилем.

Для количественной оценки емкости, вносимой резиновой прокладкой, обратимся к формуле емкости плоского конденсатора [3]:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – постоянная диэлектрической проницаемости диэлектрика;

$\varepsilon_0$  – постоянная диэлектрической проницаемости вакуума,  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$S$  – площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;

$d$  – расстояние между пластинами конденсатора, м.

В указанной емкости диэлектриком является резиновая прокладка ЦП-328 толщиной 10 мм, шириной 145 мм, диэлектрическая проницаемость 7,0.

Площадь пластин конденсатора  $S$  образуется шириной резиновой прокладки и шириной подошвы рельса Р65 (150 мм) и будет равна  $0,02175$  м<sup>2</sup> для одного рельса. В соответствии со сводом правил [6] на участках, где предусмотрена укладка бесстыкового пути, железобетонные шпалы должны укладываться с равным расстоянием между их осями (543 мм для эпюры 1840 шт. и 500 мм для эпюры 2000 шт. на 1 км пути). С учетом кривых среднее количество шпал 1920 на километр. Таким образом емкость, вносимая резиновой прокладкой на 1 км пути,

$$C_{р. п} = 7 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{2 \cdot 1920 \cdot 0,02175}{0,01} = 0,518 \text{ мкФ.}$$

Для количественной оценки емкости, вносимой двумя диэлектриками – пеноплексом и геотекстилем, обратимся к формуле [4]:

$$C = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – постоянные диэлектрической проницаемости соответственно вакуума, пеноплекса и геотекстиля, Ф/м;

$S$  – площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;

$d_1$ ,  $d_2$  – толщина диэлектриков, м.

В указанной емкости диэлектриками являются пеноплекс толщиной 0,06 м, диэлектрическая проницаемость 2,5 и геотекстиль толщиной 0,004 м, диэлектрическая проницаемость 5,5. Площадь соприкосновения диэлектрика и пластин конденсатора выбирают по меньшей стороне, т. е. со стороны щебеночного балласта, минимальная ширина 3,6 м. Площадь 1 км рельсовой линии однопутного участка для средних размеров балластной призмы составляет 3600 м<sup>2</sup>. Таким образом, емкость, вносимая двумя диэлектриками – пеноплексом и геотекстилем – на 1 км пути

$$C_{п. г} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{2,5 \cdot 5,5 \cdot 3600}{2,5 \cdot 0,06 + 5,5 \cdot 0,004} = 2,548 \text{ мкФ.}$$

Тогда результирующую емкость 1 км бесстыкового пути можно определить по формуле:

$$C_0 = \frac{C_{р. п} \cdot C_{п. г}}{C_{р. п} + C_{п. г}} = 0,43 \text{ мкФ.} \quad (5)$$

Для расчета напряжения электрического влияния КС на рельсы нужно оценить емкость  $C_{1с}$  между КС и рельсами своего пути, а также  $C_{1дб}$  между КС смежного пути и ближним рельсом своего пути,  $C_{1дд}$  между КС смежного пути и дальним рельсом своего пути.

Контактная сеть как конденсатор состоит из двух частей: контактного провода и несущего троса, включенных параллельно, т. е. их нужно сложить. Если минимальная высота

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

контактного провода 5,75 м, а максимальная 6,8 м, то для расчета возьмем среднюю 6,3 м. Среднее расстояние от контактного провода до несущего троса 0,4 м. В качестве площади конденсатора выступает нижняя поверхность контактного провода МФ-85 (профиль на рисунке 3), где  $A = 12$  мм,  $H = 11$  мм. Тогда площадь нижней поверхности 1 км контактного провода можно найти по формуле:

$$S_{к. п} = \pi \cdot \frac{A}{2} \cdot 1000 = 3,14 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 18,85 \text{ м}^2, \quad (6)$$

где  $A$  – диаметр нижней части, м;

1000 – длина, м.

Рассчитаем по формуле (6) площади для других марок контактного провода:

для МФ-100 –

$$S_{к. п} = \pi \cdot \frac{A}{2} \cdot 1000 = 3,14 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 22,18 \text{ м}^2;$$

для МФ-120 –

$$S_{к. п} = \pi \cdot \frac{A}{2} \cdot 1000 = 3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 26,61 \text{ м}^2.$$

В качестве несущего троса используется М-120, площадь нижней поверхности на 1 км составляет 22 м<sup>2</sup>. Так как площадь поверхности рельса больше, то за площадь обкладки конденсатора принимаем площадь КС.

Расстояние от контактного провода до рельсов своего пути одинаковое и составляет 6,35 м, от несущего троса до рельсов своего пути – 6,74 м. При ширине междупутья 4,1 м расстояние от контактного провода до ближнего рельса соседнего пути составляет 7,13 м, до дальнего рельса – 7,96 м. Расстояние от несущего троса до ближнего рельса соседнего пути составляет 7,49 м, до дальнего рельса – 8,28 м. С учетом того, что диэлектриком в данных случаях выступает воздух с диэлектрической постоянной, равной 1,0006, рассчитав нужные нам емкости по формуле (3), занесем результаты в таблицу 1.

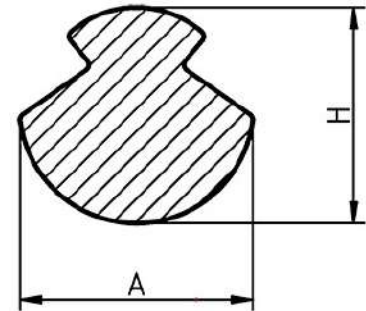


Рисунок 3 – Форма профиля контактного провода

Таблица 1 – Результаты расчета емкостей

Емкость	Значение для контактного провода, мкФ		
	МФ-85	МФ-100	МФ-120
Между КС и рельсами своего пути $C_{1с}$	0,00011043	0,00011972	0,00013209
Между КС и ближним рельсом соседнего пути $C_{1дб}$	0,00004944	0,00005358	0,00005909
Между КС и дальним рельсом соседнего пути $C_{1дд}$	0,00004452	0,00004823	0,00005316

Подставив полученные значения в формулу (2), рассчитаем  $U_3$  и результат занесем в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета напряжения электрического влияния

Электрическое влияние	Значение $U_3$ для контактного провода, В		
	МФ-85	МФ-100	МФ-120
Между КС и рельсами своего пути	7,06	7,65	8,45
Между КС и ближним рельсом соседнего пути	6,32	6,85	7,56
Между КС и дальним рельсом соседнего пути	5,69	6,17	6,80

Результаты расчета показали, что наводимое напряжение от контактного провода на рельсы через емкостную связь не является опасным для обслуживающего персонала.

Наведенное напряжение электрического влияния зависит от типа контактного провода и от его натяжения. Разность напряжений, наводимых контактным проводом соседнего пути на ближний и дальний рельсы, составляет 0,63 В для контактного провода МФ-85, 0,68 В для контактного провода МФ-100 и 0,76 В для контактного провода МФ-120. Указанные значения наведенных напряжений не будут оказывать существенного влияния на работу рельсовых цепей автоблокировки, однако будут оказывать негативное воздействие на работу системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН). Если принять сопротивление поездного шунта равным нормативному 0,06 Ом, то ток от наведенного напряжения, возникающий под приемными катушками, будет соответственно равен при МФ-85 10,5 А, при МФ-100 11,3 А, а при МФ-120 12,7 А.

Электромагнитная обстановка предусматривает, что нормативный ток асимметрии, т. е. разность токов левого и правого рельсов, не должна превышать 4 %:

$$K_a = \frac{I_{T1} - I_{T2}}{I_{T1} + I_{T2}} \leq 4 \%, \quad (7)$$

где  $K_a$  – коэффициент асимметрии тягового тока;

$I_{T1}$  – ток в первом рельсе;

$I_{T2}$  – ток во втором рельсе.

При максимальном токе в одном из рельсов 150 А нормативный ток асимметрии составит 11,54 А. Принимая во внимание, что реальное сопротивление поездного шунта (первой колесной пары) электровоза значительно меньше нормативного 0,06 Ом, установленная разница наведенных напряжений электрического влияния будет ухудшать установленные условия электромагнитной обстановки для системы АЛСН. Полученные результаты расчетов доказывают наличие новой причины сбоев кодов АЛСН, которая раньше была неизвестна, поскольку во всех учебниках по электромагнитной совместимости электрифицированных железных дорог указано на отсутствие электрического влияния на рельсы. Приведенные в статье положения могут быть использованы при разработке методов снижения количества сбоев в системе АЛСН.

### Список литературы

1. Лунев, С. А. Исследование переходного сопротивления «рельс – земля» на бесстыковом пути / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 5. – С. 35–36.
2. Исследование влияния усиленного капитального ремонта пути на обратную тяговую сеть / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, А. Г. Ходкевич, В. В. Дремин. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 2. – С. 9–11.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – Новосибирск : Сибирское университетское изд-во, 2005. – 512 с. – Текст : непосредственный.
4. Котельников, А. В. Специфические особенности заземления в системах тягового электроснабжения железных дорог и метрополитенов / А. В. Котельников, А. Б. Косарев. – Текст : непосредственный // Первая российская конференция по заземляющим устройствам: сборник докладов / под ред. Ю. В. Целебровского / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 2002. – С. 137–141.
5. Ходкевич, А. Г. Заземление средних точек дроссель-трансформаторов на участках бесстыкового пути / А. Г. Ходкевич, В. Я. Требин. – Текст : непосредственный // Ресурсосберегающие технологии в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги : материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2005. – С. 164–169.

6. Свод правил СП 238.1326000.2015 «Железнодорожный путь». – Москва : Министерство транспорта Российской Федерации, 2015. – 71 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Khodkevich A.G. Investigation of the rail-to-ground transient resistance on a jointless track. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2008, no. 5, pp. 35-36 (In Russian).

2. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Khodkevich A.G., Dremin V.V. Investigation of the effect of enhanced track repairs on the reverse traction network. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2020, no. 2, pp. 9-11 (In Russian).

3. *Pravila ustroistva elektroustanovok. 7-e izdanie* [Rules for the installation of electrical installations. 7th edition]. Novosibirsk, Siberian University Publ., 2005, 512 p. (In Russian).

4. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. [Specific features of grounding in traction power supply systems of railways and subways]. *Pervaya rossiiskaia konferentsiia po zazemliaiushchim ustroistvam: sbornik dokladov* [The first Russian conference on grounding devices: a collection of reports]. Novosibirsk, 2002, pp. 137-141 (In Russian).

5. Khodkevich A.G., Trebin V.Ya. [Grounding of the middle points of throttle transformers on sections of a jointless route]. *Resursosberegaiushchie tekhnologii v strukturnykh podrazdeleniakh Zapadno-Sibirskoi zheleznoi dorogi: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Resource-saving technologies in the structural divisions of the West Siberian Railway: materials of the scientific and practical conference]. Omsk, 2005, pp. 164-169 (In Russian).

6. *Svod pravil SP 238.1326000.2015 «Zheleznodorozhnyi put'»* [Code of rules of SP 238.1326000.2015 «Railway track»]. Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation Publ., 2015, 71 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Ходкевич Антон Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-56-47.

E-mail: HodkevichAG@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ходкевич, А. Г. Изменение условий электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с тяговой сетью переменного тока на участках бесстыкового пути / А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 2 – 8.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Khodkevich Anton Gennadyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, docent, head of the department «Railway Signalling and Interlocking», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-56-47.

E-mail: HodkevichAG@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khodkevich A.G. Changing the conditions of electromagnetic compatibility of railway automation devices with AC power supply on sections of a seamless track. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 2-8 (In Russian).

А. Н. Савоськин<sup>1</sup>, А. П. Васильев<sup>1</sup>, А. Ю. Тимченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>ООО «АВП Технология», г. Москва, Российская Федерация

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ И ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЯХ КОЛЕБАНИЙ, ВКЛЮЧЕННЫХ ПО ТИПОВОЙ СХЕМЕ И ПО СХЕМЕ УПРУГОЗАЩИЩЕННОГО ГАСИТЕЛЯ ДЛЯ УПРОЩЕННОЙ ОДНОМАССОВОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОВОЗА

**Аннотация.** Целью данной работы является исследование динамических процессов в механической части подвижного состава, рессорное подвешивание которого включает в себя типовой либо упругозащищенный гаситель колебаний и параллельно установленную с ним пружину. В качестве объекта исследования рассматривается одноосная одномассовая модель с одной ступенью рессорного подвешивания, соответствующая четырехосной секции грузового электровоза. Моделируются вертикальные колебания экипажа при случайном кинематическом возмущении в виде неровности пути и двух вариантах конструкции ступени рессорного подвешивания: с обычным (типовым) и упругозащищенным (предлагаемым) гидравлическими гасителями. Решение уравнений колебаний выполнено в частотной области с определением вещественной, мнимой и амплитудной частотных характеристик диссипативных сил обычного и упругозащищенного гидравлических гасителей колебаний, связывающих изменение сил указанных гасителей с кинематическим возмущением. Выполнены расчеты по определению величин диссипативных сил и показателей динамических качеств (ускорения массы и коэффициента динамики) при действии случайного кинематического возмущения. Такое возмущение задавалось выражениями спектральных плотностей неровностей раздельно для низкочастотной и высокочастотной областей. При этом спектральные плотности колебаний подрессоренной массы при типовой и предлагаемой схемах рессорного подвешивания определялись по формуле Шеннона. Результаты расчетов показали, что диссипативные силы в предлагаемой схеме рессорного подвешивания с упругозащищенным гасителем существенно меньше, чем в типовой. Практическая значимость исследований заключается в том, что применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний существенно снижает динамические силы, действующие на гаситель, что способствует увеличению срока его службы в эксплуатации.

**Ключевые слова:** гидравлический гаситель, упругозащищенный гаситель, рессорное подвешивание, случайные вертикальные колебания, показатели динамических качеств.

Anatoly N. Savoskin<sup>1</sup>, Andrei P. Vasilev<sup>1</sup>, Alexander Yu. Timchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

<sup>2</sup>«AVP Technology», Moscow, the Russian Federation

## COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC QUALITY PARAMETERS AND DISSIPATIVE FORCES IN HYDRAULIC VIBRATION DAMPERS INCLUDED ACCORDING TO THE STANDARD SCHEME AND ACCORDING TO THE SCHEME OF AN ELASTIC-PROTECTED DAMPER FOR AN ELECTRIC LOCOMOTIVE SIMPLIFIED SINGLE-MASS MODEL

**Abstract.** The purpose of this work is to study dynamic processes in the spring suspension of a rolling stock. The rolling stock spring suspension includes a typical or elastic-protected vibration damper with parallel installed spring. The object of research is a single-axle single-mass model with one spring suspension level which corresponds to a four-axle section of an electric freight locomotive. The vertical vibrations of the rolling stock are simulated with a random kinematic disturbance which is the rail irregularities. These simulations perform with two design variants of the spring suspension stage: with a conventional (standard) and an elastic-protected hydraulic damper. The solution of the vibration equations is performed in the frequency domain with the determination of the real, imaginary and amplitude frequency characteristics of the dissipative forces of conventional and elastically protected hydraulic vibration dampers linking the change in the forces of these dampers with kinematic perturbation. The perturbation was determined by expressions of the spectral densities of irregularities separately for the low-frequency and high-frequency ranges. At the same time, the spectral densities of vibrations of the sprung mass in the typical and proposed spring suspension schemes were determined by the Shannon formula. The calculation results showed that the dissipative forces in the proposed spring suspension

*scheme with an elastically protected damper are significantly less than in the standard one. The practical significance of the research is that the use of an elastically protected hydraulic vibration damper significantly reduces the dynamic forces acting on the damper, which helps to increase its service life in operation.*

**Keywords:** hydraulic damper, elastic-protected damper, spring suspension, random vertical vibrations, dynamic quality parameters

В последнее время для демпфирования вертикальных колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания стали применять гидравлические гасители колебаний с коэффициентом затухания  $\beta_1$ , включенные по типовой схеме параллельно с пружинами жесткостью  $\mathcal{J}_1$ .

Математическая модель вынужденных вертикальных колебаний одномассовой системы с такой схемой включения гидравлического гасителя достаточно подробно описана в источниках [1, с. 71 – 73] и [2]. При этом из-за больших амплитуд высокочастотных составляющих возмущения в буксовой ступени возникает высокий уровень динамических сил, действующих на гаситель, что приводит к частым их отказам в эксплуатации.

Так, например, по данным сервисного локомотивного депо г. Иркутска, количество отказов гасителей вертикальных колебаний составило 968 за 2020 и 2021 гг. Из этого количества 875 отказов (т. е.  $\sim 90\%$ ) соответствовало буксовым гасителям и только 93 отказа (т. е.  $\sim 10\%$ ) – гасителям центральной ступени. Таким образом, отказы буксовых вертикальных гасителей происходили в девять раз чаще, чем вертикальных гасителей центрального подвешивания.

Рассмотрим способ снижения уровня и частоты вибраций, действующих на вертикальные гасители буксовой ступени, на основе установки последовательно с гидравлическим гасителем пружины [1 – 3], что соответствует «подпружиненному» или упругозащищенному гасителю колебаний с эквивалентной динамической жесткостью  $\mathcal{J}_d^3(j\omega)$  (рисунок 1, а).

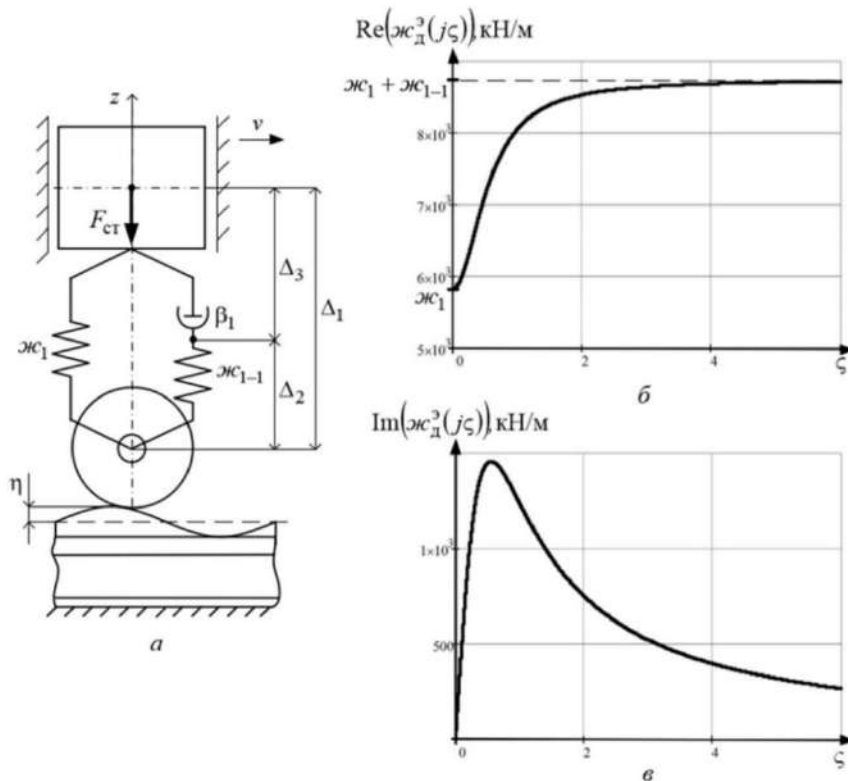


Рисунок 1 – Комплект рессорного подвешивания с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний (а); его упругая (б) и диссипативная (в) характеристики ( $F_{ct}$  – сила тяжести,  $\Delta_1$  – деформация пружины  $\mathcal{J}_1$ ,  $\beta_1$  – коэффициент затухания,  $\eta$  – неровность рельсов,  $\zeta$  – безразмерная частота,  $v$  – скорость движения)

При последовательном соединении пружины с жесткостью  $\mathcal{J}_{1-1}$  и гидравлического гасителя с динамической жесткостью  $j\beta_1\omega$  эквивалентная жесткость такого соединения будет равна  $\frac{j\mathcal{J}_{1-1}\beta_1\omega}{\mathcal{J}_{1-1} + j\beta_1\omega}$ . Параллельно с этими элементами установлена пружина с жесткостью  $\mathcal{J}_1$ .

Как известно, при параллельном соединении упругих элементов их жесткости складываются, тогда эквивалентная динамическая жесткость будет такой:

$$\mathcal{J}_d^3(j\omega) = \mathcal{J}_1 + \frac{j\mathcal{J}_{1-1}\beta_1\omega}{\mathcal{J}_{1-1} + j\beta_1\omega}, \quad (1)$$

Домножив числитель и знаменатель второго слагаемого на комплексно-сопряженное  $(\mathcal{J}_{1-1} - j\beta_1\omega)$ , получим окончательное выражение эквивалентной динамической жесткости:

$$\mathcal{J}_d^3(j\omega) = \mathcal{J}_1 + \frac{\mathcal{J}_{1-1}\beta_1^2\omega^2}{\mathcal{J}_{1-1}^2 + \beta_1^2\omega^2} + j\frac{\mathcal{J}_{1-1}\beta_1\omega}{\mathcal{J}_{1-1}^2 + \beta_1^2\omega^2}. \quad (2)$$

На рисунке 1, б, в показаны графики зависимостей вещественной  $\text{Re}(\mathcal{J}_d^3(j\zeta))$  и мнимой  $\text{Im}(\mathcal{J}_d^3(j\zeta))$  частей эквивалентной динамической жесткости от безразмерной частоты  $\zeta = \omega/\omega_c$ .

Определим диссипативные силы гасителя  $F_d$  для типовой и предлагаемой схем рессорного подвешивания, которые не только обеспечивают рассеивание энергии колебаний и снижение их амплитуд, но и воздействуют на внутренние детали гасителя, что ведет к накоплению повреждений этих деталей, вызывающих необходимость выполнения ремонтных работ. Для типовой схемы подвешивания можно записать:

$$F_d(j\omega) = j\omega\beta\Delta(j\omega) = j\omega\beta[z(j\omega) - \eta(j\omega)] \quad (3)$$

или

$$F_d(j\omega) = j\omega\beta[W_{z-\eta}(j\omega) - 1]\eta(j\omega), \quad (4)$$

где  $W_{z-\eta}(j\omega)$  – частотная характеристика (ЧХ), связывающая колебания подрессоренной массы  $z(j\omega)$  с неровностью  $\eta(j\omega)$  [1, 4 – 8]:

$$W_{z-\eta}(j\omega) = \frac{\mathcal{J} + j\omega\beta}{\mathcal{J} - m\omega^2 + j\omega\beta}. \quad (5)$$

Отсюда ЧХ, связывающая диссипативную силу гасителя колебаний с возмущением,

$$W_{F_d-\eta}(j\omega) = j\omega\beta [W_{z-\eta}(j\omega) - 1] = j\beta\omega \left[ \frac{\mathcal{J} + j\omega\beta}{\mathcal{J} - m\omega^2 + j\omega\beta} - 1 \right] = \frac{j\beta m\omega^3}{\mathcal{J} - m\omega^2 + j\omega\beta}. \quad (6)$$

Перейдем в выражении (6) к функции нормированной частоты  $\zeta = \omega/\omega_c$  ( $\omega_c = \sqrt{\mathcal{J}/m}$  – собственная частота колебаний) и заменим коэффициент затухания  $\beta$  через относительное затухание  $n = \beta/2\sqrt{m\mathcal{J}}$ :

$$W_{F_d-\eta}(j\zeta) = \frac{4n^2\mathcal{J}_1\zeta^4}{(1-\zeta^2)^2 + 4n^2\zeta^2} + j\frac{2n\mathcal{J}_1\zeta^3(1-\zeta^2)}{(1-\zeta^2)^2 + 4n^2\zeta^2} \quad (7)$$

или, введя новые обозначения:

$$W_{F_{д-н}}(j\zeta) = P_{F_{д-н}}(\zeta) + jU_{F_{д-н}}(\zeta) = A_{F_{д-н}}(\zeta)e^{j\varphi_{F_{д-н}}(\zeta)}, \quad (8)$$

где  $P_{F_{д-н}}(\zeta)$ ,  $U_{F_{д-н}}(\zeta)$ ,  $A_{F_{д-н}}(\zeta)$  и  $\varphi_{F_{д-н}}(\zeta)$  – соответственно вещественная, мнимая, амплитудная (АЧХ) и фазовая (ФЧХ) частотные характеристики, которые определяются следующими выражениями:

$$P_{F_{д-н}}(\zeta) = \frac{4n^2 \varepsilon \zeta^4}{(1-\zeta^2)^2 + 4n^2 \zeta^2}; \quad (7a)$$

$$U_{F_{д-н}}(\zeta) = \frac{2n\varepsilon \zeta^3 (1-\zeta^2)}{(1-\zeta^2)^2 + 4n^2 \zeta^2}; \quad (7б)$$

$$A_{F_{д-н}}(\zeta) = \frac{2n\varepsilon \zeta^3 \sqrt{4n^2 \zeta^2 + (1-\zeta^2)^2}}{(1-\zeta^2)^2 + 4n^2 \zeta^2}; \quad (7в)$$

$$\varphi_{F_{д-н}}(\zeta) = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{(1-\zeta^2)}{2n\zeta} + \pi & \text{при } \zeta < 1; \\ \operatorname{arctg} \frac{(1-\zeta^2)}{2n\zeta} & \text{при } \zeta \geq 1. \end{cases} \quad (7г)$$

Графики  $P_{F_{д-н}}(\zeta)$ ,  $U_{F_{д-н}}(\zeta)$  и  $A_{F_{д-н}}(\zeta)$  на рисунке 2 показывают, что вид этих характеристик существенно зависит от относительного затухания  $n$ . Так, например, график вещественной частотной характеристики (рисунок 2, а) при увеличении частоты  $\zeta$  от нуля до единицы быстро возрастает до максимального значения, при дальнейшем росте частоты снижается. При этом скорость снижения определяется величиной  $n$ . При  $n = 0,2$  эта скорость максимальна и с увеличением частоты она замедляется.

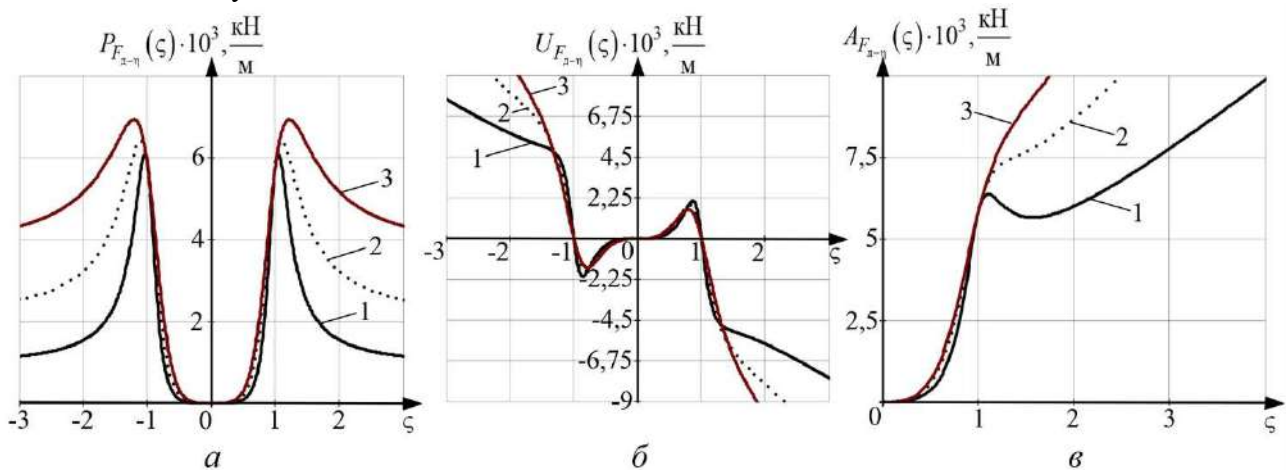


Рисунок 2 – Графики вещественной (а), мнимой (б) и амплитудной (в) частотных характеристик силы гидравлического гасителя колебаний для типовой схемы включения этого гасителя:

1 – при  $n = 0,2$ ; 2 – при  $n = 0,3$ ; 3 – при  $n = 0,4$

График мнимой частотной характеристики (рисунок 2, б) при увеличении  $\zeta$  от нуля вначале возрастает, достигая максимума, а затем резко снижается, пересекая ось частот при  $\zeta=1$ . Дальнейший рост  $\zeta$  вызывает продолжение снижения  $U_{F_{д-н}}(\zeta)$  уже в четвертом

квадранте. При этом на вид этой характеристики большое влияние начинает оказывать величина  $n$ .

График АЧХ (рисунок 2, в) возрастает с увеличением  $\zeta$  и в сильной степени зависит от величины  $n$ . Так, при  $n = 0,2$  график АЧХ достигает максимума при частоте  $\zeta$ , близкой к 1, и затем снижается. При  $n = 0,3$  снижение АЧХ уже не наблюдается – она начинает возрастать, а при  $n = 0,4$  этот экстремум не проявляется и  $A_{F_{д-н}}(\zeta)$  непрерывно увеличивается с ростом  $n$ .

В заключение отметим, что возрастание АЧХ  $A_{F_{д-н}}(\zeta)$  при частотах  $\zeta > 1$  вызовет значительное увеличение силы  $F_{д}(\zeta)$  в этой области частот при вынужденных колебаниях, что может привести к снижению межремонтного пробега гасителя.

Диссипативная сила, развиваемая гасителем в предлагаемой схеме рессорного подвешивания с упругозащищенным гасителем (рисунок 1, а) на основе (2) определится выражением:

$$F_{д}^{y3}(j\omega) = \beta_1 \dot{\Delta}_3 = j \frac{\mathcal{K}_{1-1} \beta_1 \omega}{\mathcal{K}_{1-1} + j\beta_1 \omega} \Delta_1(j\omega) \quad (9)$$

или

$$F_{д}^{y3}(j\omega) = j \frac{\mathcal{K}_{1-1} \beta_1 \omega}{\mathcal{K}_{1-1} + j\beta_1 \omega} [W_{z_{1-н}}^{y3}(j\omega) - 1] \eta(j\omega), \quad (10)$$

или

$$F_{д}^{y3}(j\omega) = W_{F_{д-н}}^{y3}(j\omega) \eta(j\omega), \quad (10a)$$

где  $W_{F_{д-н}}^{y3}(j\omega)$  – ЧХ, связывающая диссипативную силу с возмущением:

$$W_{F_{д-н}}^{y3}(j\omega) = j \frac{\mathcal{K}_{1-1} \beta_1 \omega}{\mathcal{K}_{1-1} + j\beta_1 \omega} [W_{z_{1-н}}^{y3}(j\omega) - 1]. \quad (11)$$

Графики  $P_{F_{д-н}}^{y3}(\zeta)$ ,  $U_{F_{д-н}}^{y3}(\zeta)$  и  $A_{F_{д-н}}^{y3}(\zeta)$  на рисунке 3 показывают, что вид этих характеристик существенно зависит от относительного затухания  $n$ . Так, например, график вещественной частотной характеристики (рисунок 3, а) при увеличении частоты  $\zeta$  от нуля до единицы быстро снижается до минимального значения, затем резко возрастает при  $\zeta \approx 1$ , а при дальнейшем росте частоты снижается. При этом скорость снижения определяется величиной  $n$ . При  $n = 0,2$  эта скорость минимальна и с увеличением  $n$  она возрастает.

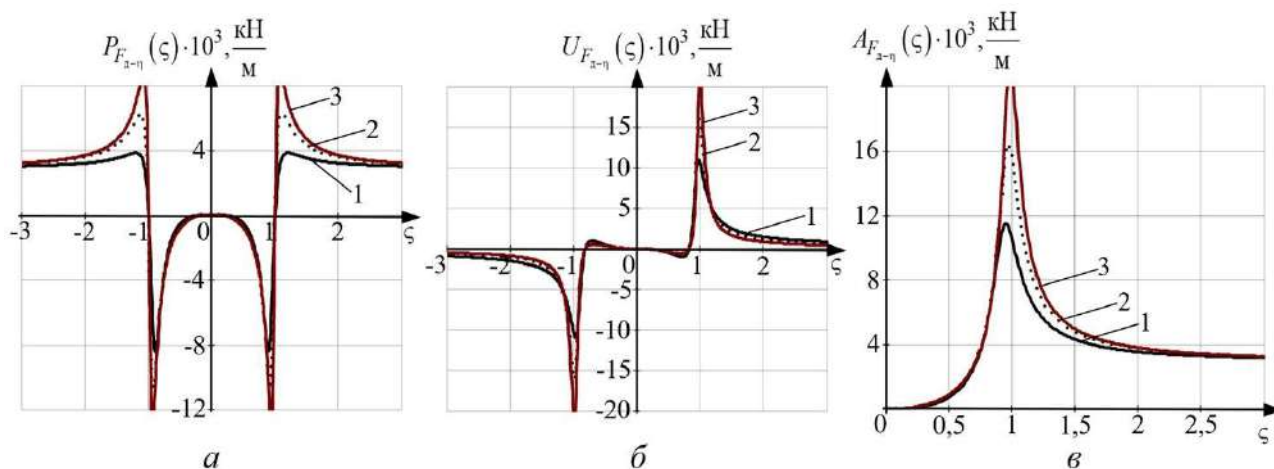


Рисунок 3 – Графики вещественной (а), мнимой (б) и амплитудной (в) частотных характеристик диссипативной силы в упругозащищенном гасителе колебаний: 1 – при  $n = 0,2$ ; 2 – при  $n = 0,3$ ; 3 – при  $n = 0,4$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

График мнимой частотной характеристики (рисунок 3, б) при увеличении  $\zeta$  от нуля вначале возрастает, достигая максимума, а затем резко снижается при частоте, большей  $\zeta = 0,95 \div 1$ . Дальнейший рост  $\zeta$  вызывает продолжение снижения  $U_{F_d-\eta}^{y3}(\zeta)$ . При этом на вид этой характеристики большое влияние начинает оказывать величина  $n$ .

График АЧХ (рисунок 3, в) возрастает с увеличением  $\zeta$  и в сильной степени зависит от величины  $n$ . Так, при  $n = 0,2, 0,3$  и  $0,4$  графики АЧХ достигают максимума при частоте  $\zeta$ , близкой к 1, и затем снижаются. При этом с повышением  $n$  увеличиваются и значения максимумов АЧХ. При частоте  $\zeta > 1$  значения АЧХ снижаются при всех  $n$ , т. е. в этой области частот сила  $F_d(\zeta)$  снижается в отличие от силы в обычном гасителе (рисунок 2, в).

Выполненный анализ частотных характеристик  $W_{F_d-\eta}(j\zeta)$  и  $W_{F_d-\eta}^{y3}(j\omega)$  показал, что динамические свойства типовой схемы рессорного подвешивания и схемы с упругозащищенным гасителем существенно различаются. Для окончательной оценки преимуществ схемы с упругозащищенным гасителем (см. рисунок 1) были выполнены расчеты по определению величины диссипативной силы и показателей динамических качеств (ускорения массы и коэффициента динамики) при действии случайного возмущения. Такое возмущение задавалось выражениями спектральных плотностей неровностей отдельно для низкочастотной  $G_{\eta_{нч}}(f, v)$  [9] и высокочастотной  $G_{\eta_{вч}}(f)$  [10] областей. При этом спектральные плотности колебаний массы  $m$  при типовой и предлагаемой схемах рессорного подвешивания определялись по формуле Шеннона:

$$G_{1,2}(f) = A_{1,2}^2(f) [G_{\eta_{нч}}(f, v) + G_{\eta_{вч}}(f)], \quad (12)$$

где  $A_{1,2}(f)$  – амплитудные частотные характеристики для типовой и предлагаемой схем рессорного подвешивания.

По найденным  $G_{1,2}(f)$  для разных вариантов расчета определялись дисперсии  $S_{1,2}^2(f, v)$ , эффективные частоты  $f_e(v)$  и средние значения абсолютных максимумов  $H_a(v)$ . По этим числовым характеристикам вычислялись показатели динамических качеств [1, 9] – максимальные значения диссипативных сил  $F_{d \max}$  в гасителях колебаний, коэффициентов динамики  $k_d$  и ускорений  $a_{\max}$  (рисунок 4). Как видно из рисунка 4, с увеличением скорости все показатели качества возрастают.

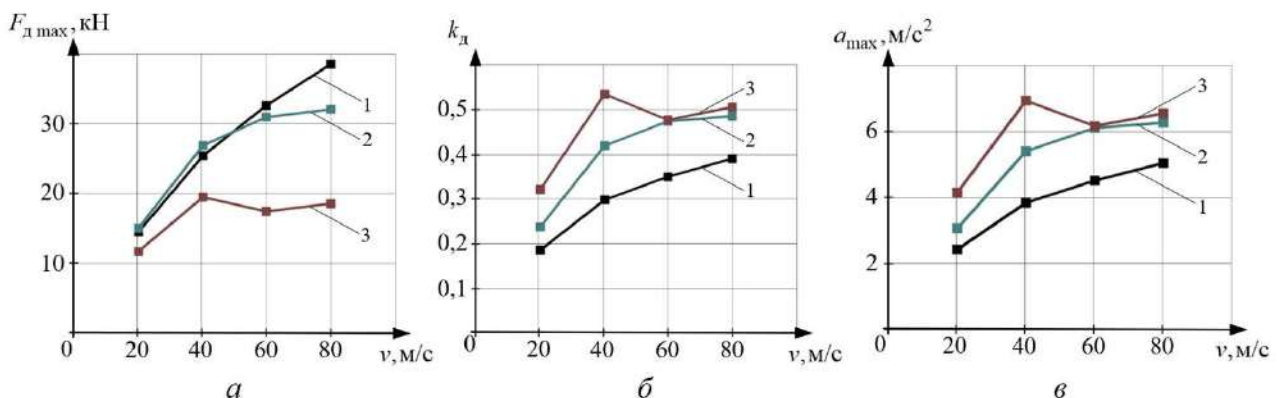


Рисунок 4 – Зависимости максимальных значений динамических сил (а), коэффициентов динамики (б) и ускорений (в) от скорости движения: типовая схема подвешивания – 1; с упругозащищенным гасителем при  $\zeta_{1-1} = 1,5$  – 2; при  $\zeta_{1-1} = 0,5$  – 3

При этом диссипативные силы в предлагаемой схеме рессорного подвешивания существенно меньше, чем в типовой. Так, например, при  $\mathcal{J}_{1-1} = 0,5\mathcal{J}_1$  (рисунок 4, а, кривая 3) величина  $F_{d\max}$  не превышает 20 кН, в то время как для типовой схемы подвешивания  $F_{d\max}(v)$  возрастает от ~15 до ~40 кН (рисунок 4, а, кривая 1), превышая все время аналогичную зависимость для упругозащищенного гасителя при  $\mathcal{J}_{1-1} = 0,5\mathcal{J}_1$ .

Вместе с тем показатели динамических качеств, такие как коэффициенты динамики и максимальные ускорения массы (рисунок 4, б и в) в типовой схеме ниже, чем в предлагаемой. В связи с этим необходимо выполнить новый цикл исследований на полноразмерной модели экипажа с выбором оптимальных параметров рессорного подвешивания в схеме рессорного подвешивания с упругозащищенным гасителем колебаний.

Техническая эффективность применения упругозащищенного гасителя колебаний определяется тем, что диссипативная сила в таком гасителе, как уже говорилось, снижается в два раза по сравнению с типовой схемой включения гидравлического гасителя. Это приведет к снижению числа отказов буксовых гасителей колебаний и повышению их межремонтного пробега. Более обоснованные данные по снижению диссипативных сил будут получены на полноразмерной модели колебаний электровоза.

### Список литературы

1. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник – под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. / Репринт. воспроиз. – Москва : Альянс, 2013. – 440 с. – Текст : непосредственный.
2. Savoskin A.N. Selection of springs and vibration dampers connection diagram in railway vehicles spring suspension. *Sciences of Europe*, 2019, no. 13, pp. 61-66.
3. Савоськин, А. Н. Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рессорном подвешивании локомотивов / А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская, П. Ю. Иванов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 134–147.
4. Савоськин, А. Н. Проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра / А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 6. – С. 327–336.
5. Савоськин, А. Н. Случайные процессы возмущения в динамике рельсовых экипажей / А. Н. Савоськин, Ю. С. Ромен, А. А. Акишин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 1 (56). – С. 6–15.
6. Sheng X., Thompson D.J., Jones C.J.C., Xie G., Iwnicki S.D., Allen P., Hsu S.S. Simulations of roughness initiation and growth on railway rails. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 293, iss. 3-5, pp. 819-829.
7. Коган, А. Я. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава / А. Я. Коган, Э. Д. Загитов, И. В. Полещук. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т. 75. – № 4. – С. 195–200.
8. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса / В. О. Певзнер, А. И. Чечельницкий, К. В. Шапетько [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 5. – С. 271–275.
9. Савоськин, А. Н. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, Д. А. Бондаренко. – Москва : Альянс, 2022. – 612 с. – Текст : непосредственный.

10. Руководящий документ отрасли РД 32. 68–96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. № А-11у; 06.04.1997. – Текст : непосредственный.

## References

1. Biryukov I.V. ed. *Mekhanicheskaiia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava : uchebnik* [Mechanical part of traction rolling stock : textbook]. Moscow: Transport Publ., 1992, 440 p., Reprint to reproduce – Moscow : Alliance Publ., 2013, 440 p. (In Russian).

2. Savoskin A.N. Selection of springs and vibration dampers connection diagram in railway vehicles spring suspension. *Sciences of Europe*, 2019, no. 13, pp. 61-66.

3. Savoskin A.N., Lavlinskaya N.S., Ivanov P.Yu. The use of an elastically protected hydraulic vibration damper in spring suspension of locomotives. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2022, vol. 81, no. 2, pp. 134-147 (In Russian).

4. Savoskin A.N., Lavlinskaya N.S. Verification of the adequacy of the methodology for generating a random process of perturbation of vibrations of rail carriages according to the impulse response of the forming filter. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 6, pp. 327-336 (In Russian).

5. Savoskin A.N., Romen Yu.S., Akishin A.A. Random disturbance processes in the dynamics of rail vehicles. *Mir transporta – World Of Transport And Transportation*, 2015, vol. 13, no. 1 (56), pp. 6-15 (In Russian).

6. Sheng X., Thompson D.J., Jones C.J.C., Xie G., Iwnicki S.D., Allen P., Hsu S.S. Simulations of roughness initiation and growth on railway rails. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 293, iss. 3-5, pp. 819-829.

7. Kogan A.Ya., Zagitov E.D., Poleshchuk I.V. Random processes of interaction of a track and a rolling stock. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2016, vol. 75, no. 4, pp. 195-200 (In Russian).

8. Pevsner V.O., Chechel'nitsky A.I., Shapetko K.V., Sidorova E.A., Slastenin A.Yu. The influence of long longitudinal profile irregularities on traffic safety in conditions of intensification of the transportation process. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 5, pp. 271-275 (In Russian).

9. Savoskin A.N., Burchak G.P., Bondarenko D.A. *Veroiatnostnye metody v zadachakh dinamiki, prochnosti i bezotkaznosti rel'sovykh ekipazhei* [Probabilistic methods in problems of dynamics, strength and reliability of rail carriages]. Moscow, Alliance Publ., 2022, 612 p. (In Russian).

10. Industry Guidance document RD 32. 68-96. Calculated railway track irregularities for use in research and design of passenger and freight wagons. No. А-11у; 04.06.1997 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Савоськин Анатолий Николаевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (903) 278-42-50.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

### Васильев Андрей Павлович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Savos'kin Anatolii Nikolaevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor, professor of the department «Electric multiple-unit trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (903) 278-42-50.

E-mail: elmechtrans@mail.ru

### Vasil'ev Andrei Pavlovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994,  
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ  
(МИИТ).

Тел.: +7 (905) 779-97-21.

E-mail: stud16@yandex.ru

## Тимченко Александр Юрьевич

ООО «АВП Технология».

Электrozаводская ул., д. 21, стр. 16, г. Москва,  
107023, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, советник генераль-  
ного директора.

Тел.: +7 (985) 774-80-22.

E-mail: timchenko@list.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савоськин, А. Н. Сравнительный анализ  
показателей динамических качеств и диссипативных  
сил в гидравлических гасителях колебаний,  
включенных по типовой схеме и по схеме  
упругозащищенного гасителя для упрощенной  
одномассовой модели электровоза / А. Н. Савоськин,  
А. П. Васильев, А. Ю. Тимченко. – Текст : непосред-  
ственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). –  
С. 9 – 17.

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian  
Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, associate  
professor of the department «Electric multiple-unit trains  
and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (905) 779-97-21.

E-mail: stud16@yandex.ru

## Timchenko Aleksandr Yur'evich

LLC «AVP Technology».

21, b. 16, Elektrozavodskaya st., Moscow, 107023,  
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Advisor to the General  
Director.

Phone: +7 (985) 774-80-22.

E-mail: timchenko@list.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savos'kin A.N., Vasil'ev A.P., Timchenko A.Yu.  
Comparative analysis of dynamic quality parameters and  
dissipative forces in hydraulic vibration dampers included  
according to the standard scheme and according to the  
scheme of an elastic-protected damper for an electric  
locomotive simplified single-mass model. *Journal of  
Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 9-17  
(In Russian).

УДК 629.4.027.2(045)

**С. В. Чунин, А. С. Гасюк, Д. М. Фазлиахметов, Е. В. Муравлев, О. А. Лобачев**

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного  
состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

## К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ЛОКОМОТИВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Аннотация.** Данная статья отражает возможность по амплитуде сил определить коэффициент запаса  
сопротивления усталости несущих конструкций экипажной части локомотивов. Статья посвящена анализу  
применимости использования предела выносливости по амплитуде сил для определения коэффициента запаса  
сопротивления усталости несущих конструкций экипажной части (рам тележек, промежуточных рам,  
боковин и др.) локомотивов по результатам стендовых и ходовых испытаний.

Исследования включали в себя анализ существующих подходов к определению коэффициента запаса  
сопротивления усталости несущих конструкций экипажной части локомотивов (рам тележек,  
промежуточных рам, боковин и др.).

В работе предложено усовершенствование метода оценки прочности несущих конструкций экипажной  
части локомотивов. Показана возможность (целесообразность) использования предела выносливости по силам  
(амплитудам сил) для определения минимального коэффициента запаса сопротивления усталости. Предложено  
оценку прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов проводить по результатам испытаний  
их на усталость при ступенчатой схеме нагружения с учетом теории линейного суммирования повреждений,  
данных об эксплуатационной нагруженности и последующей обработки статистическими методами.  
Приведены примеры схемы приложения вертикальных и горизонтальных сил к раме тележки и ступенчатого  
нагружения вертикальными силами трех образцов рамы тележки, а также результаты расчетов приведенных  
пределов выносливости.

**Ключевые слова:** локомотив, рама тележки, промежуточная рама, боковина, предел выносливости,  
коэффициент запаса сопротивления усталости, испытания.

Sergey V. Chunin, Aleksandr S. Gasyuk, Damir M. Fazliakhmetov, Evgeny V. Muravlev,  
Oleg A. Lobachev

Joint-stock company «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»),  
Kolomna, the Russian Federation

## ABOUT IMPROVING METHODS FOR ESTIMATING THE STRENGTH OF LOCOMOTIVE UNDERFRAME LOAD-BEARING ELEMENTS BASED ON BENCH TEST RESULTS

**Abstract.** *The article describes the possibility to determine the fatigue strength safety factor of locomotive underframe load-bearing elements based on force amplitudes. The article is devoted to the analysis of the applicability of using the endurance limit based on force amplitudes to determine the fatigue strength safety factor of locomotive underframe load-bearing elements (bogie frames, intermediate frames, side frames, etc.) based on the results of bench and running tests.*

*The research included the analysis of current approaches to determine the fatigue strength safety factor of locomotive underframe load-bearing elements (bogie frames, intermediate frames, side frames, etc.).*

*The article proposes an improvement in the method for estimating the strength of locomotive underframe load-bearing elements. The possibility (expediency) of using the fatigue strength based on forces (force amplitudes) to determine the minimum fatigue strength safety factor is shown. It is proposed to estimate the strength of locomotive underframe load-bearing elements based on the results of their fatigue tests under a stepwise loading scheme, taking into account the theory of linear damage summation, data on operating load and subsequent processing by statistical methods. Examples of a scheme for applying vertical and horizontal forces to the bogie frame and stepwise loading of three bogie frame samples with vertical forces are provided, as well as the results of calculations of the mentioned endurance limits.*

**Keywords:** *locomotive, bogie frame, intermediate frame, side frame, endurance limit, fatigue strength safety factor, tests.*

По действующим отраслевым нормативным документам сопротивление усталости несущих конструкций локомотивов оценивается коэффициентом запаса сопротивления усталости при его минимальной допускаемой величине. Такая оценка обоснована результатами исследований и анализом технического состояния деталей, подтверждена многолетним опытом эксплуатации локомотивов и соответствует конструкторско-технологическим особенностям экипажной части локомотивов.

В существующих методиках при расчете несущих конструкций локомотивов на прочность коэффициенты запаса вычисляются в точках с наибольшими номинальными напряжениями и в зонах значительной концентрации напряжений.

При этом наименьший из вычисленных коэффициентов запаса принимается как коэффициент запаса сопротивления усталости детали. В зонах с наименьшим коэффициентом запаса сопротивления обычно и происходит разрушение детали (возникают трещины) от действия испытательных нагрузок. В некоторых случаях методом тензометрирования проблематично с достаточной точностью определить зоны максимальных напряжений и соответственно обеспечить достаточную точность определения предела выносливости и коэффициента запаса сопротивления усталости (он может быть завышен).

В данной статье предложено усовершенствование метода оценки прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов, заключающееся в возможности использования предела выносливости по амплитуде сил для вычисления минимального коэффициента запаса сопротивления усталости.

Согласно п. 15 ГОСТ 16504–81 методики испытаний должны быть аттестованы для подтверждения их точности, достоверности и (или) воспроизводимости результатов испытаний и их соответствия заданным требованиям. То же относится и к методикам расчетов, применяемым при проектировании, согласно ст. 18 гл. 4 Федерального закона [1]. В этой связи в настоящей статье рассмотрены вопросы совершенствования действующих методик испытаний в условиях коллизии требований п. 15 ГОСТ 16504–81 и требований ст. 18 гл. 4 Федерального закона [1, 2].

Коэффициент запаса сопротивления усталости  $n$  практически зависит только от величины условного предела выносливости по амплитуде сил  $P_{a(0,95)}$  – единственного экспериментального параметра, определяющего качество деталей [3].

Следует отметить, что в соответствии с п. 9.5.4 ГОСТ 33788–2016 результаты определения предела выносливости по амплитуде силы используют для вычисления коэффициента запаса сопротивления усталости  $\tilde{n}$  боковой рамы и надрессорной балки согласно требованиям ГОСТ 32400–2013:

$$\tilde{n} = \frac{P_m + \Delta}{P_{a.э}}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – предел выносливости по амплитуде силы при базовом числе циклов  $N_0 = 10^7$  и односторонней доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ ;  $P_{a.э}$  – приведенная амплитуда вертикальной силы, Н, действующей на деталь;  $\Delta$  – корректирующая добавка, вычисляемая по формуле:  $\Delta = \psi (P_m - P_{ст})$ , где  $\psi$  – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла, принимают  $\psi = 0,05$ ;  $P_m$  – средняя сила, действующая на деталь при испытаниях, Н;  $P_{ст}$  – действующая на деталь сила тяжести вагона с максимальной расчетной массой, Н.

По другой методике [4] коэффициент запаса сопротивления усталости литых деталей тележек производится по зависимости

$$n = \frac{P_{a(0,95)} + \Psi\sigma (P_T - P_{ст}K_{и})}{P_{ст}K_{и}K_{д.э}}, \quad (2)$$

где  $P_{a(0,95)}$  – предел выносливости детали при вероятности неразрушения 0,95 при базовом числе циклов нагружения  $N_0 = 10^7$ , полученный по результатам усталостных испытаний;  $\Psi\sigma$  – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла;  $P_T$  – постоянная средняя нагрузка цикла;  $P_{ст}$  – вертикальная статическая нагрузка брутто на деталь;  $K_{и}$  – коэффициент использования грузоподъемности вагона;  $K_{д.э}$  – коэффициент вертикальной динамической нагрузки на деталь.

По результатам стендовых испытаний на сопротивление усталости конструкций экипажной части локомотивов в соответствии с п. 8.3.5.2 ГОСТ Р 55513–2013 показатель  $n$  определяют по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{a.э}} \geq [n], \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1д}$  – предел выносливости образца для заданной вероятности неразрушения  $P = 95\%$ , полученный по результатам стендовых испытаний на сопротивление усталости нескольких образцов;  $\sigma_{a.э}$  – амплитуда (эквивалентная) динамических напряжений от эксплуатационных нагрузок. Она определяется путем статистической обработки схематизированных случайных процессов с построением гистограмм распределения текущих значений амплитуд динамических напряжений ( $\sigma_{a_i}$ ) при различных скоростях движения локомотива с учетом их доли в эксплуатации;  $[n]$  – нормативное значение показателя, для стальных конструкций  $[n] = 2,0$ , для конструкций из алюминиевых сплавов  $[n] = 2,2$ .

Анализ данных, полученных по результатам стендовых испытаний несущих конструкций экипажной части локомотивов, проведенных в АО «ВНИКТИ», показал, что величины напряжений (амплитуды напряжений) объектов испытаний в основном пропорциональны значениям испытательных эквивалентных нагрузок, т. е. существует линейная зависимость между вертикальной испытательной нагрузкой (при условии неизменного значения испытательной боковой (рамной) силы) и значениями напряжений в наиболее нагруженных зонах объектов, где существует наибольшая вероятность появления усталостных трещин. Незначительная нелинейность зависимости между значениями силы и напряжения объясняются неидеальностью прилегания испытуемых объектов в местах опирания и выбором зазоров в процессе нагружения.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В процессе испытаний к объектам (рамам) может прикладываться комбинация испытательных вертикальных и горизонтальных (боковых) переменных сил, или, например, к боковинам – только вертикальная переменная сила. Пример схемы приложения вертикальных и горизонтальных сил к раме тележки приведен на рисунке 1. При этом нагружение объектов проводится ступенями, путем увеличения амплитуды цикла вертикальной силы  $F_a^B$ .

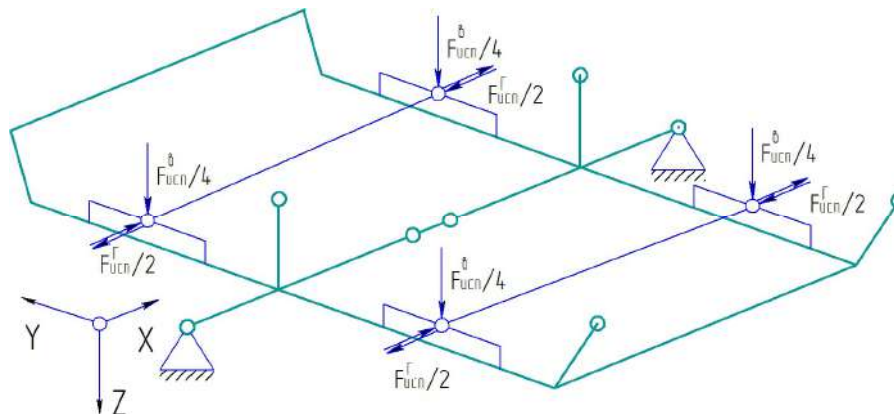


Рисунок 1 – Схема приложения испытательных нагрузок к двухосной раме тележки:  $F_{исп}^B = F^B \pm F_a^B$  – нагрузка на раму тележки от вертикальных сил;  $F^B$  – постоянная составляющая цикла;  $F_a^B$  – амплитуда цикла;  $F_{исп}^Г$  – поперечная нагрузка (рамная сила)

Целесообразность определения коэффициента запаса сопротивления усталости несущих конструкций экипажной части локомотивов по силе (амплитуде сил) вызвана (определяется) следующими причинами:

результаты тензометрирования дублируют (в неполной мере) прочностные расчеты, выполняемые современными программными продуктами;

исключается погрешность измерения величин напряжений, вызываемая влиянием различных факторов, в том числе разбросом значений модуля Юнга материалов (в первую очередь литых деталей [2]), чувствительностью показаний тензорезисторов к направлению и координатам мест их расположения при их наклейке (особенно заметно в зонах со сложной формой и концентраторах напряжений);

уменьшаются трудоемкость и себестоимость проведения стендовых испытаний, что особенно актуально при проведении испытаний образцов сложной конструкции, изготовленных из современных материалов по новым технологиям.

Показатель  $n$  следует определять по формуле:

$$n = \frac{F_r^{P=0,95}}{F_{a.э}} \geq [n], \quad (4)$$

где  $F_r^{P=0,95}$  – предел выносливости образца по амплитуде силы для заданной вероятности разрушения  $P = 95 \%$ , полученный по результатам стендовых испытаний на сопротивление усталости нескольких образцов;  $F_{a.э}$  – амплитуда (эквивалентная) динамических сил от действия эксплуатационных нагрузок, определяется путем статистической обработки схематизированных случайных процессов с построением гистограмм распределения текущих значений амплитуд динамических сил ( $F_{a,i}$ ) при различных скоростях движения локомотива с учетом их доли в эксплуатации.

Амплитуда определяется путем статистической обработки схематизированных случайных процессов с построением гистограмм распределения текущих значений амплитуд динамических сил ( $F_{a,i}$ ) с вероятностью их появления ( $P_{\sigma_i}$ ) при различных скоростях движения локомотива с учетом их доли ( $P_{V_i}$ ) в эксплуатации с суммарным числом циклов нагружения за срок службы ( $N_{сум}$ ) по формуле:

$$F_{a. \text{э}} = \sqrt[m]{\frac{N_{\text{сум}}}{N_0} \sum P_{Vi} \cdot \sum F_{ai}^m \cdot P_{\sigma i}} \quad (5)$$

Предел выносливости по амплитуде сил  $F_{rj}$ , кН, для каждого  $j$ -го объекта при вероятности неразрушения  $P = 0,5$  в детерминированной постановке, с учетом линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений проводится по формуле:

$$F_{rj} = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \sum_i^n F_i^m N_i} \quad (6)$$

где  $N_0 = 10^7$  – приведенная база испытаний;  $N_i$  – число циклов, воспринимаемых конструкцией на каждой  $i$ -й ступени нагрузки;  $F_i$  – амплитуда сил на  $i$ -й ступени нагружения, кН;  $n$  – число уровней нагружения;  $m$  – показатель степени наклона кривой усталости, можно принимать по результатам испытаний деталей аналогичной конструкции.

Расчет приведенного предела выносливости по формуле (6) выполняется с учетом ранее полученных данных при испытаниях на базе  $10^7$  циклов.

Предел выносливости по силе  $F_{Rk}$  для вероятности неразрушения 95 % определяется по формуле (табл. 6.2 ГОСТ Р 50779.21–2004):

$$F_{Rk}^{p=0,95} = \overline{F_{Rk}}_{\text{cp}} - S_{\overline{F_{Rk}}} \cdot \frac{t_a}{\sqrt{k}} \quad (7)$$

где  $\overline{F_{Rk}}_{\text{cp}} = \frac{\sum_j \overline{F_{Rkj}}}{k}$  – среднеарифметическое значение предела выносливости по силе;

$$S_{\overline{F_{Rk}}} = \sqrt{\frac{\sum_i (\overline{F_{Rkj}} - \overline{F_{Rk}}_{\text{cp}})^2}{k-1}}$$

– среднеквадратическое отклонение значения предела

выносливости по силе;  $t_a$  – коэффициент Стьюдента (табл. 6.1 ГОСТ 50779.21–2004);

$k$  – количество испытываемых объектов.

На рисунке 2 показаны примеры ступенчатого нагружения вертикальными силами трех образцов рамы тележки и результаты расчетов приведенных пределов выносливости для вероятности неразрушения 50 и 95 %.

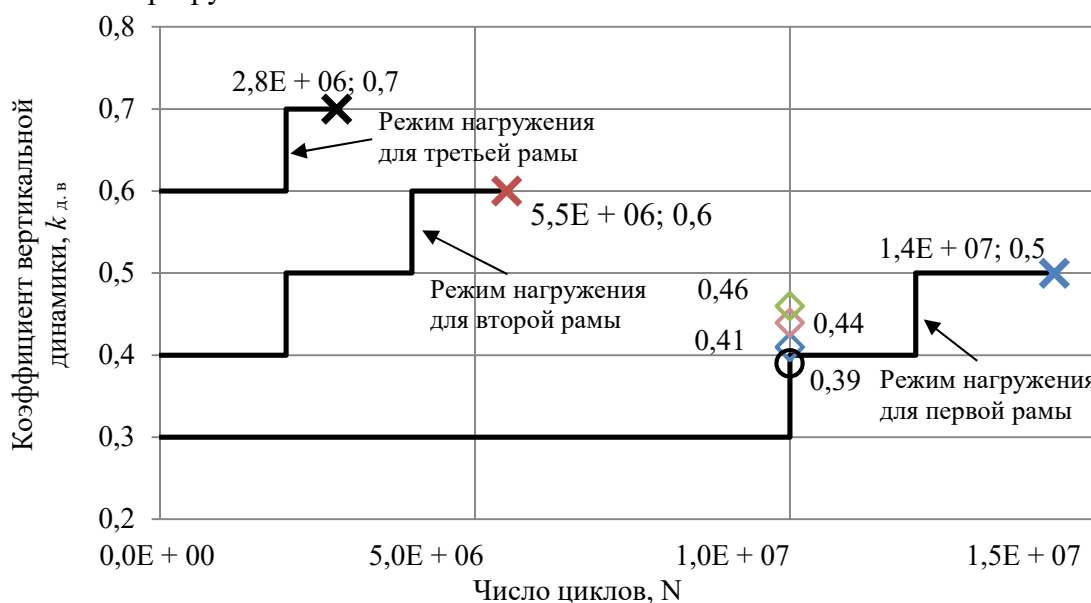


Рисунок 2 – Схема ступенчатого нагружения вертикальными силами трех образцов рамы тележки:  
 $k_{д.в}$  – коэффициент вертикальной динамики, равный отношению  $F_a^B$  к  $F^B$ ;

× – появление видимой усталостной трещины; ◊ – приведенный предел выносливости;

○ – предел выносливости для вероятности неразрушения 95 %

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Предложено усовершенствование методики оценки прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов по результатам проведения стендовых испытаний, заключающееся в возможности определения минимального коэффициента запаса сопротивления усталости по силам (амплитудам сил).

2. Оценку прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов можно проводить по результатам испытаний их на усталость при ступенчатой схеме нагружения с учетом теории линейного суммирования повреждений, данных об эксплуатационной нагруженности и последующей обработки статистическими методами.

## Список литературы

1. О техническом регулировании: Федеральный закон № 184-ФЗ (с изменениями на 2 июля 2021 г.): [Принят Государственной думой 15 декабря 2002 г.: Одобрен Советом Федерации 18 декабря 2002 г.]. – Москва, 2022. – 22 с. – Текст : непосредственный.

2. Плоткин, В. С. К вопросу совершенствования методик оценки прочности литых деталей тележек грузовых вагонов при их проектировании и испытаниях для цели подтверждения соответствия / В. С. Плоткин, А. М. Краснобаев, О. А. Краснобаев. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 6. – С. 33–37.

3. Сухов, А. В. К оценке сопротивления усталости литых деталей тележек грузовых вагонов // А. В. Сухов, В. А. Рейхарт. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 1. – С. 43–48.

4. Пастухов, М. И. Оценка технического ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов по коэффициенту запаса сопротивления усталости / М. И. Пастухов. – Текст : непосредственный // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2017. – № 2. – С. 11–17.

5. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса рамы тележки и промежуточной рамы восьмиосного тепловоза / С. В. Чунин, А. С. Гасюк [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2023. – Т. 82. – № 4. – С. 335–346.

## References

1. About technical regulation: Federal Law No. 184-FZ, Moscow, 2022. 22 p. (In Russian).

2. Plotkin V.S., Krasnobayev A.M., Krasnobayev O.A. On the Improvement of Strength Assessment Procedures of Freight Car Bogie Cast Parts at the Design and Test Stages as Performed for Validation Purposes. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2014, no. 6, pp. 33-37 (In Russian).

3. Sukhov A.V., Reikhart V.A. More on the Fatigue Resistance Assessment of the Freight Car Bogies' Cast Parts. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2015, no. 1, pp. 43-48 (In Russian).

4. Pastukhov M.I. Estimating the service life of freight wagon bogie cast parts based on the fatigue strength safety factor. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P.O. Sukhogo – Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*, 2017, no. 2, pp. 11-17 (In Russian).

5. Chunin S.V., Gasyuk A.S., Timakov M.V., Fazliakhmetov D.M., Muravlev E.V., Lobachev O.A. Calculation and experimental evaluation of bogie frame and intermediate frame life of an eight-axle diesel locomotive. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2023, vol. 82, no. 4, pp. 335-346 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чунин Сергей Владимирович**

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Chunin Sergey Vladimirovich**

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна,  
Московская область, 140402, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией испытаний на усталость.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

## Гасюк Александр Сергеевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна,  
Московская область, 140402, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий  
отделом прочности.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-88.

E-mail: gasyuk-as@vnikti.com

## Фазлиахметов Дамир Муратович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна,  
Московская область, 140402, Российская Федерация.

Ведущий инженер.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: fazliakhmetov-dm@vnikti.com

## Муравлев Евгений Владимирович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна,  
Московская область, 140402, Российская Федерация.

Ведущий инженер.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: muravlev-ev@vnikti.com

## Лобачев Олег Александрович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна,  
Московская область, 140402, Российская Федерация.

Ведущий инженер.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 13-36.

E-mail: lobachev-oa@vnikti.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

К вопросу совершенствования методик оценки прочности несущих конструкций экипажной части локомотивов по результатам стендовых испытаний // С. В. Чунин, А. С. Гасюк, Д. М. Фазлиахметов, Е. В. Муравлев, О. А. Лобачев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 17 – 23.

410, October Revolution st., Kolomna, 140402,  
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Head of the Fatigue Testing  
Laboratory.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 13-36.

E-mail: chunin-sv@vnikti.com

## Gasyuk Aleksandr Sergeyeovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology  
Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, October Revolution st., Kolomna, 140402,  
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Head of the Strength  
Department.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-88.

E-mail: gasyuk-as@vnikti.com

## Fazliakhmetov Damir Muratovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology  
Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, October Revolution st., Kolomna, 140402,  
the Russian Federation.

Senior Engineer.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 13-36.

E-mail: fazliakhmetov-dm@vnikti.com

## Muravlev Evgeny Vladimirovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology  
Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, October Revolution st., Kolomna, 140402,  
the Russian Federation.

Senior Engineer.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 13-36.

E-mail: muravlev-ev@vnikti.com

## Lobachev Oleg Aleksandrovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology  
Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, October Revolution st., Kolomna, 140402,  
the Russian Federation.

Senior Engineer.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 13-36.

E-mail: lobachev-oa@vnikti.com

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Chunin S.V., Gasyuk A.S., Fazliakhmetov D.M.,  
Muravlev E.V., Lobachev O.A. About improving  
methods for estimating the strength of locomotive  
underframe load-bearing elements based on bench test  
results. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024,  
no. 2 (58), pp. 17-23 (In Russian).

О. А. Лукьянова<sup>1</sup>, И. С. Гершман<sup>2</sup>, Н. В. Мирнонос<sup>2</sup>, А. А. Царьков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»),  
г. Москва, Российская Федерация

## КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

**Аннотация.** В статье рассмотрены факторы и условия эксплуатации электроподвижного состава, влияющие на взаимодействие токоприемника и контактной подвески, перечислены показатели токосъема, регламентируемые в современной отечественной нормативной документации, определение которых недостаточно для оценки работоспособности и создания системы токосъема, отвечающей заданным требованиям.

На основе многолетнего опыта разработок в области организации скоростного и высокоскоростного движения сложилось два подхода к решению этой задачи, каждый из которых подразумевал работу только над одной из взаимодействующих подсистем. Авторами предлагается третий, комплексный подход, который позволит определить технически и экономически обоснованные параметры токоприемника и контактной подвески для обеспечения качественного токосъема и требуемых скоростей движения. В качестве основных определены не учитываемые в отечественных стандартах показатели, основанные на оценке износа токосъемных элементов при проходе их по контактному проводу.

Разработанная концепция состоит из нескольких этапов, включая формирование технического задания; параллельное проектирование двух механических подсистем (токоприемника и контактной подвески); создание математической модели их взаимодействия, которое характеризуется стабильным контактным нажатием и выбор величины которого осуществляется на основе триботехнических свойств используемых материалов и величины тока в контакте; проверка и корректировка указанной модели по результатам экспериментальных исследований на соответствие требованиям технического задания.

Применение разработанной методики позволит создать систему токосъема, обеспечивающую высокую надежность и экономичность, дополнить нормативную базу в части разработки системы токосъема и порядка оценки конструктивных решений, касающихся системы токосъема. Предложенный подход позволит ускорить процесс разработки системы токосъема для высокоскоростных железнодорожных линий и значительно снизить затраты на это.

**Ключевые слова:** токосъем, токоприемник, контактная подвеска, контактная сеть, испытания, моделирование.

Olesya A. Lukyanova<sup>1</sup>, Iosif S. Gershman<sup>2</sup>, Nikolay V. Mironos<sup>2</sup>, Anton A. Tsarkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC «VNIIZHT»), Moscow, the Russian Federation

## CONCEPT OF CURRENT COLLECTION SYSTEM DEVELOPMENT FOR HIGH SPEED LINES

**Abstract.** The article discusses the factors and operating conditions of electric rolling stock that influence the interaction of the current collector and the catenary, lists the current collection indicators regulated in modern domestic regulatory documentation, the definition of which is not enough to assess the performance and create a current collection system that meets the specified requirements.

Based on many years of development experience in the field of organizing high-speed and high-speed traffic, two approaches to solving this problem have emerged, each of which implied work on only one of the interacting subsystems. The authors propose a third comprehensive approach that will allow us to determine technically and economically sound parameters of the pantograph and contact suspension to ensure high-quality current collection and the required speeds. The main indicators are those that are not taken into account in domestic standards and are based on assessing the wear of current-collecting elements as they pass along the contact wire.

The developed concept consists of several stages, including the implementation of technical specifications; parallel design of two mechanical subsystems (pantograph and catenary); creation of a mathematical model of their interaction, which provides stable contact loads and selection of sizes, the implementation of which is based on the tribological properties of the supplied materials and determination of the current in the contact; checking and adjusting the specified model based on the results of experimental studies for compliance with the requirements of the technical specifications.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

*The application of the developed methodology will make it possible to create a current collection system that ensures high reliability and efficiency, to supplement the regulatory framework regarding the development of a current collection system and the procedure for assessing design solutions regarding the current collection system. The proposed approach will speed up the process of developing a current collection system for high-speed railway lines and significantly reduce the costs of this.*

**Keywords:** current collection, current collector, catenary suspension, catenary network, testing, modeling.

На качество токосъема влияют скорость движения электроподвижного состава, сила тока и уровень напряжения в контактной сети, климатические условия эксплуатации, показатели надежности, требуемые ресурсные показатели (количество проходов токоприемников до замены контактных проводов, пробег контактных вставок до замены и т. п.), экологические требования (химическое, шумовое и электромагнитное загрязнение).

Обеспечение качественного взаимодействия токоприемника с контактной подвеской является одной из приоритетных задач, требующей выбора оптимального технического решения с учетом имеющихся технических возможностей и заданных параметров элементов системы токосъема. В соответствии с ГОСТ 32793–2014 к показателям токосъема относят среднее значение контактного нажатия, среднеквадратическое отклонение контактного нажатия, коэффициент искрения, удельное число искрений. Следует отметить, что требования к показателям токосъема в российских нормативных документах не определены, однако их численные значения являются исходными данными для проектирования системы токосъема, результатом которого будут являться технические решения, позволяющие обеспечить электроснабжение подвижного состава с требуемыми показателями качества токосъема.

Для высокоскоростных магистралей задача обеспечения качественного токосъема усложняется, поскольку процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской происходит на более высоких скоростях движения и сопровождается интенсивным износом контактного провода и токосъемных элементов. На основании существующего мирового опыта можно утверждать, что срок службы контактного провода может составлять до 50 лет, пробег токосъемных вставок токоприемника – до 200 тыс. км. Поэтому с целью определения работоспособности системы токосъема во всем мире принято проводить натурные испытания, в процессе которых становится возможным учесть большое количество факторов, конструктивные решения, свойства применяемых материалов для оценки показателей качества токосъема. Кроме того, необходимо определить концепцию разработки системы токосъема, которая позволит с наименьшими затратами разработать конструкции устройств токосъема и выбрать соответствующие им материалы, обеспечивающие оптимальные параметры токосъема. При этом оптимизационным параметром будет являться стоимость жизненного цикла, в который, в общем случае, входят все этапы от проектирования до утилизации и рекультивации прилегающих территорий.

Ученые ВНИИЖТа и отраслевых вузов на протяжении многих лет (со второй половины XX в.) совершенствовали методы и средства получения достоверных данных о токосъеме в процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвески, при этом добиваясь сокращения временных затрат и числа экспериментальных поездок подвижного состава [1].

Совершенствование системы токосъема происходило путем поочередного улучшения параметров и характеристик токоприемника и контактной сети для повышения скоростного режима движения электроподвижного состава (рисунок 1).

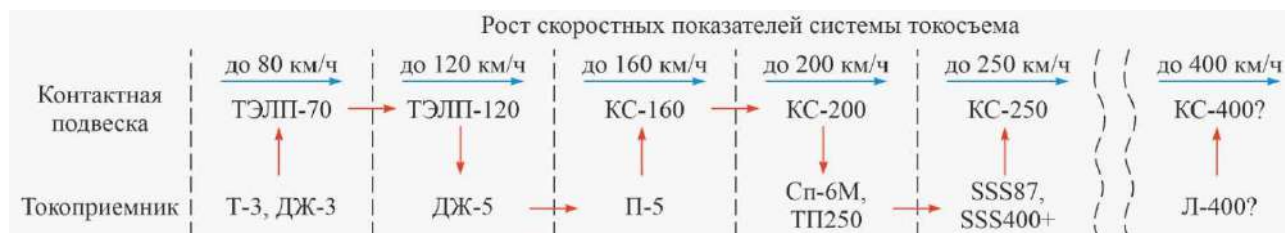


Рисунок 1 – Итерационный путь развития системы токосъема

Для обеспечения устойчивого токосъема с существующей контактной подвеской советскими специалистами был разработан специальный авторегулируемый токоприемник Сп-6М для подвижного состава ЭР-200 и ЧС-200 для скоростей движения до 200 км/ч.

В конце 1990-х гг. российскими производителями разработан высокоскоростной электропоезд «Сокол», оснащенный токоприемником типа ТП250, который должен был обеспечить взаимодействие с существовавшей в то время контактной подвеской на линии Москва – Санкт-Петербург. В ходе экспериментальных поездок на электропоезде засвидетельствована техническая возможность достижения заявленных скоростей движения (достигнута наибольшая скорость 236 км/ч). Результаты испытаний позволили провести параметризацию и в некоторой степени валидацию математических моделей системы токосъема, что способствовало проведению вычислительных экспериментов с целью получения качественных и количественных зависимостей показателей качества токосъема при изменении входных параметров и исключения неработоспособных вариантов.

В 2006 г. ОАО «РЖД» и Siemens подписали соглашение о поставке электропоездов «Сапсан» в Россию. В то время опыта эксплуатации электроподвижного состава на линиях постоянного тока со скоростью более 220 км/ч не было, поэтому следовало обосновать возможность обеспечения надежного токосъема на линии постоянного тока 3 кВ. При вводе в эксплуатацию высокоскоростного электропоезда «Сапсан» задача по обеспечению токосъема была поставлена следующим образом – необходимо разработать контактную подвеску постоянного тока, взаимодействие с которой токоприемника Siemens обеспечило бы надежный токосъем при скоростях движения до 300 км/ч. Для разработки контактной сети постоянного тока, пригодной для эксплуатации электропоезда «Сапсан», было принято решение адаптировать существующие технические решения с учетом имеющихся данных о характеристиках и показателях токоприемников, установленных на электропоезде. Поскольку полного набора данных не было, возникла необходимость получить их экспериментальным путем.

Для решения этой задачи были применены два токоприемника типа SSS87, один из которых был установлен на электровозе ЧС-200, а другой отправлен на стендовые испытания в лабораторию. В течение четырех лет проводились экспериментальные исследования с целью определения необходимых параметров контактной подвески, которые обеспечили бы надежный токосъем при скорости движения до 300 км/ч [2].

При испытаниях на электровозе ЧС-200 была достигнута скорость движения 260 км/ч. В марте 2009 г. состоялась первая тестовая поездка «Сапсана» по маршруту Москва – Санкт-Петербург. При приемочных испытаниях скорость электропоезда превышала 290 км/ч, численные значения показателей качества токосъема соответствовали требованиям европейских стандартов. В декабре того же года поезд начал коммерческую эксплуатацию.

На основании проведенной работы была доказана возможность движения по маршруту с заявленными скоростями, при этом на второй план отошли вопросы экономичности токосъема, а также вопросы дальнейшего развития и повышения эксплуатационных характеристик. Новые типы токоприемников современного и перспективного электроподвижного состава должны были по основным техническим характеристикам соответствовать немецкому образцу, так как только в этом случае система токосъема работала в номинальном режиме. Любые попытки изменения конструкции контактной сети приводили к ухудшению токосъема и требовали дополнительных исследований по гармонизации.

Из-за отсутствия в настоящее время действующего алгоритма по проектированию системы токосъема в комплексе не было возможности ни с нормативной, ни с технической точек зрения требовать от производителей железнодорожной техники учета особенностей конструкций токоприемников и контактной сети.

Исторически сложилось два подхода к решению задачи обеспечения высоких скоростей движения электроподвижного состава (рисунок 2):

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

разработка токоприемника для обеспечения взаимодействия с существующей контактной подвеской;

разработка контактной подвески для обеспечения взаимодействия с существующим токоприемником.

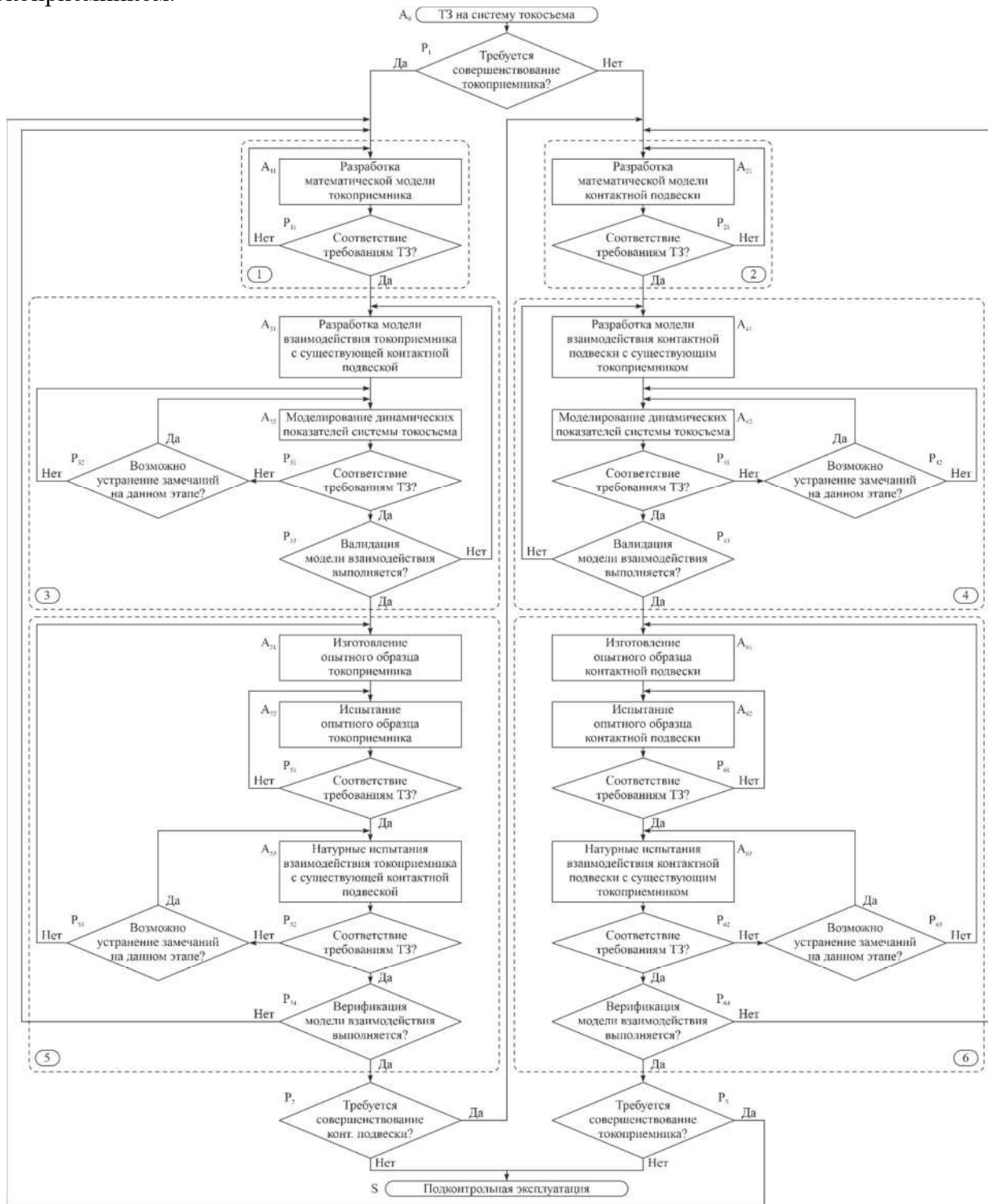


Рисунок 2 – Блок-схема традиционного подхода к разработке системы токосъема:

1 – блок проектирования токоприемника; 2 – блок проектирования контактной подвески;

3 – блок проектирования системы взаимодействия разрабатываемого токоприемника с существующей контактной подвеской; 4 – блок проектирования системы взаимодействия разрабатываемой контактной подвески с существующим токоприемником; 5 – блок испытаний системы взаимодействия разрабатываемого токоприемника с существующей контактной подвеской; 6 – блок испытаний системы взаимодействия разрабатываемой контактной подвески с существующим токоприемником

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Проектирование контактной подвески и токоприемника осуществляется на основе многолетнего опыта разработки различных проектов и технических решений по контактной подвеске и токоприемникам, при этом используются модели с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также конечно-элементными моделями в системах автоматизированного проектирования (рисунок 3) [3, 4].

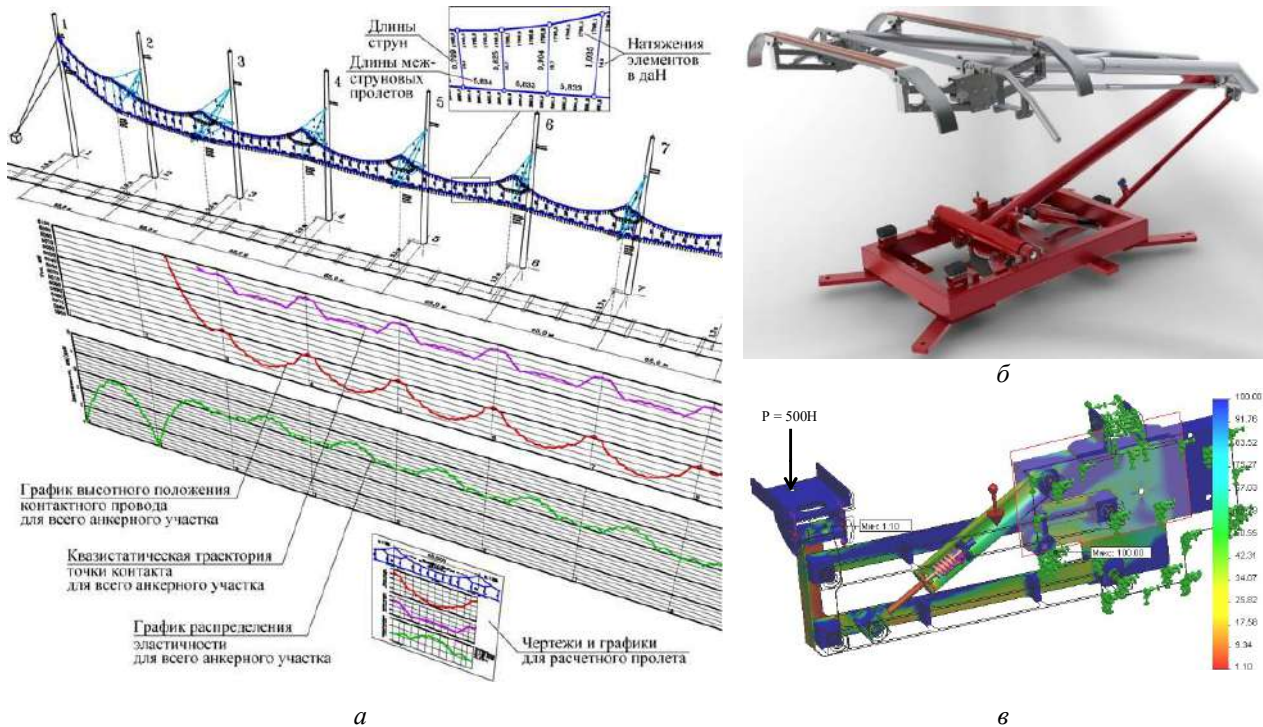


Рисунок 3 – Результаты моделирования контактной подвески (а) и токоприемника (б, в)

Существующий подход к разработке системы токосъема можно представить в виде логической схемы алгоритма:

$$A_0 P_1 \uparrow^1 \downarrow^{13} \downarrow^{54} \downarrow^{11} A_{11} P_{11} \uparrow^{11} \downarrow^{33} A_{31} \downarrow^{32} \downarrow^5 A_{32} P_{31} \uparrow^{31} \omega \uparrow^4 \downarrow^{31} P_{32} \uparrow^{32} \omega \uparrow^5 \downarrow^4 P_{33} \uparrow^{33} \downarrow^{53} A_{51} \downarrow^{51} A_{52} P_{51} \uparrow^{51} \downarrow^7 A_{53} P_{52} \cdot \uparrow^{52} \omega \uparrow^6 \downarrow^{52} P_{53} \uparrow^{53} \omega \uparrow^7 \downarrow^6 P_{54} \uparrow^{54} P_2 \uparrow^2 \downarrow^1 \downarrow^{64} \downarrow^{21} A_{21} P_{21} \uparrow^{21} \downarrow^{43} A_{41} \downarrow^{42} \downarrow^9 A_{42} P_{41} \uparrow^{41} \omega \uparrow^8 \downarrow^{41} P_{42} \uparrow^{42} \omega \uparrow^9 \downarrow^8 P_{43} \uparrow^{43} \downarrow^{63} \cdot A_{61} \downarrow^{61} A_{62} P_{61} \uparrow^{61} \downarrow^{12} A_{63} P_{62} \uparrow^{62} \omega \uparrow^{10} \downarrow^{62} P_{63} \uparrow^{63} \omega \uparrow^{12} \downarrow^{10} \cdot P_{64} \uparrow^{64} P_3 \uparrow^3 \omega \uparrow^{13} \downarrow^2 \downarrow^3 S,$$

где  $A_i$ ,  $P_i$  – функциональные и логические операторы соответственно (см. рисунок 2).

При выполнении алгоритма на выходе получается комплект параметров токоприемника и контактной подвески, реализация которых в виде конструкций обеспечивает требуемое качество токосъема. При этом не гарантировано достижение наилучшего из доступных результатов, так как токоприемник должен обеспечивать свои заявленные показатели назначения на всех типах контактной сети, смонтированной по ГОСТ Р 58322–2018, ГОСТ 33944–2016, а контактная сеть, в свою очередь, должна быть пригодной для эксплуатации со всеми типами токоприемников, соответствующими ГОСТ 32204–2013. Данные особенности традиционного подхода предполагают «универсальность» или функциональную избыточность в конструкции как токоприемника, так и контактной сети.

Предлагается разработать подход комплексного проектирования системы токосъема, в рамках которого повышение эффективности работы всей динамической системы будет происходить за счет скоординированного изменения как токоприемников, так и контактных подвесок.

Основными показателями качества системы токосъема должны выступать:

гарантированное количество проходов токоприемника по контактному проводу до достижения его предельного износа;

гарантированный пробег токосъемных элементов токоприемника.

Эти показатели технически и экономически обоснованы при расчете операционных затрат на эксплуатацию электрифицированной линии. В настоящее время стандартных требований к системе токосъема в России нет. На международном уровне приняты стандарты МЭК (IEC 62486, IEC 62846:2016), в разработке которых принимали участие российские эксперты, поэтому актуальной задачей является создание национальных стандартов по аналогии с международными.

Российские ученые сделали попытку переосмыслить традиционные подходы к проектированию под производство и строительство, так как токоприемники в чистом виде проектируются под производство, а контактная сеть – под производство и под строительство. От линейного проектирования к структурному проектированию необходимо выявить несколько стадий, которые связаны нелинейно и в зависимости от сложности проекта должны быть пройдены в несколько циклов [5]. Данный подход предлагается использовать и для системы токосъема.

Предлагается следующая многоэтапная методика разработки системы токосъема (рисунок 4) в первую очередь для новых высокоскоростных линий. Данная методика включает в себя несколько модулей и блоков.

Техническое задание (ТЗ) на систему токосъема разрабатывается в общих чертах с указанием основных параметров, таких как номинальное напряжение, ток, ресурсные показатели (срок службы контактного провода и токосъемных элементов) и др.

Проектирование системы токосъема проводится в единой информационной системе, которая позволяет обосновать перечень подлежащих расчету показателей с применением штрафных функций.

Блок проектирования токоприемника и контактной подвески включает в себя разработку математических моделей токоприемника и контактной подвески в соответствии с требованиями ТЗ.

Проектирование математической модели контактной подвески выполняется на основе существующих прикладных программ с использованием метода конечных элементов, теории и методов процессов проектирования контактной сети с учетом требований ТЗ и ГОСТ Р 58322–2018, ГОСТ 33944–2016. Соответствие спроектированной контактной подвески требованиям ГОСТ 33944–2016 подтверждается экспериментально на макете контактной подвески, который может быть спроектирован и построен в натуральную величину на любом полигоне или объекте, позволяющем реализовать геометрические параметры контактной подвески, в том числе без наличия железнодорожного полотна.

Макет контактной подвески разрабатывается и испытывается в соответствии с программами и методиками [1].

Аналогично выполняется проектирование математической модели токоприемника с учетом требований ТЗ и ГОСТ 32204–2013.

Блок проектирования токоприемника и контактной подвески предполагает обмен информацией между подсистемами «токоприемник» и «контактная подвеска» на каждом расчетном этапе.

Блок проектирования системы токосъема включает в себя разработку модели взаимодействия токоприемника с контактной подвеской с последующим моделированием их динамических и ресурсных (трибологических) показателей.

Разработку модели взаимодействия системы токосъема целесообразно проводить с применением систем автоматизированного проектирования, что позволит оптимизировать массогабаритные, аэродинамические и другие показатели модели.

В результате моделирования динамических процессов, происходящих в системе токосъема, определяют контактное нажатие, которое зависит от динамических свойств

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

токоприемника, параметров контактной подвески и скорости движения электроподвижного состава (рисунок 5).

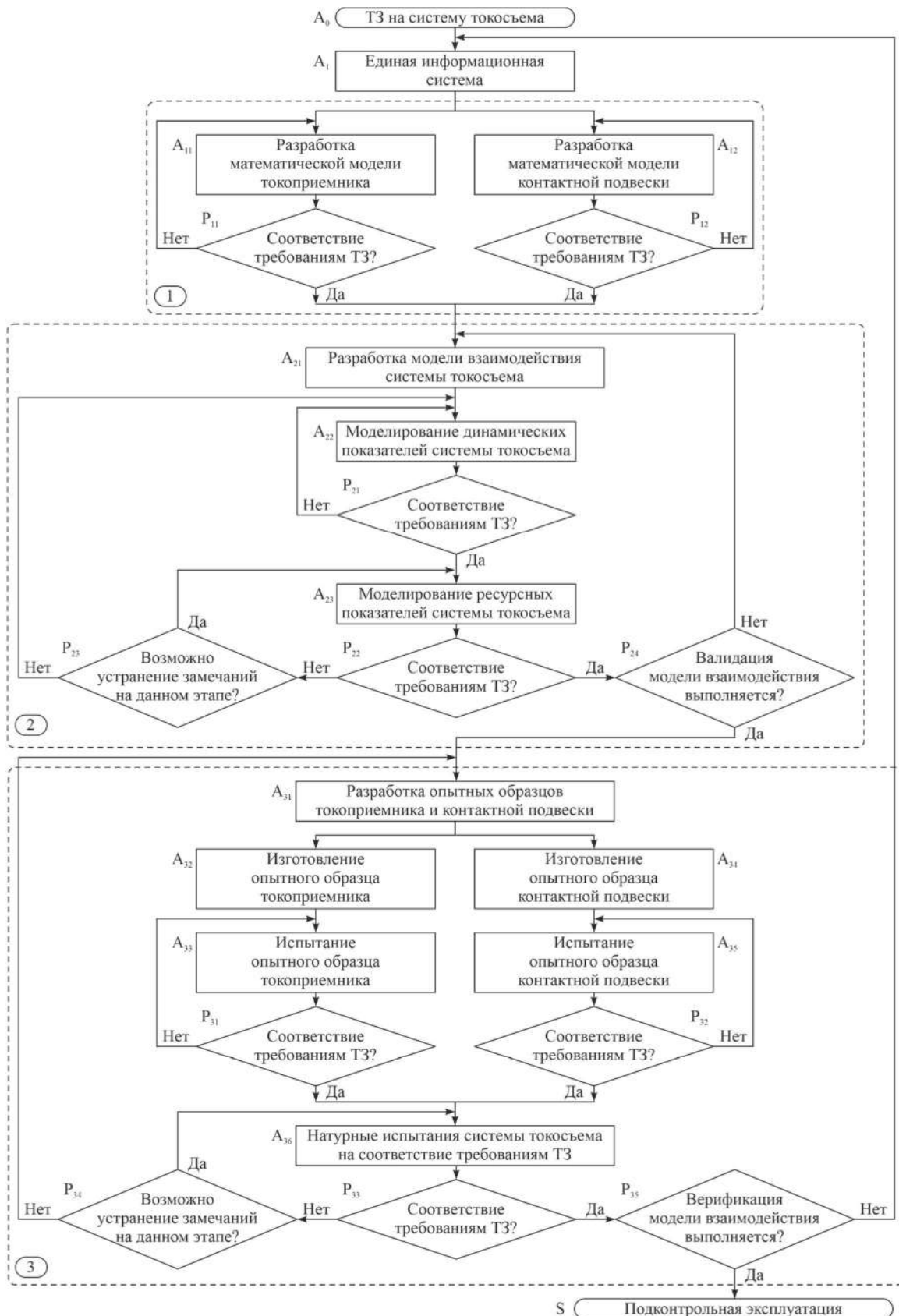


Рисунок 4 – Блок-схема предлагаемого подхода к разработке системы токосъема:

1 – блок проектирования токоприемника и контактной подвески; 2 – блок проектирования системы токосъема (взаимодействие); 3 – блок испытаний системы токосъема

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

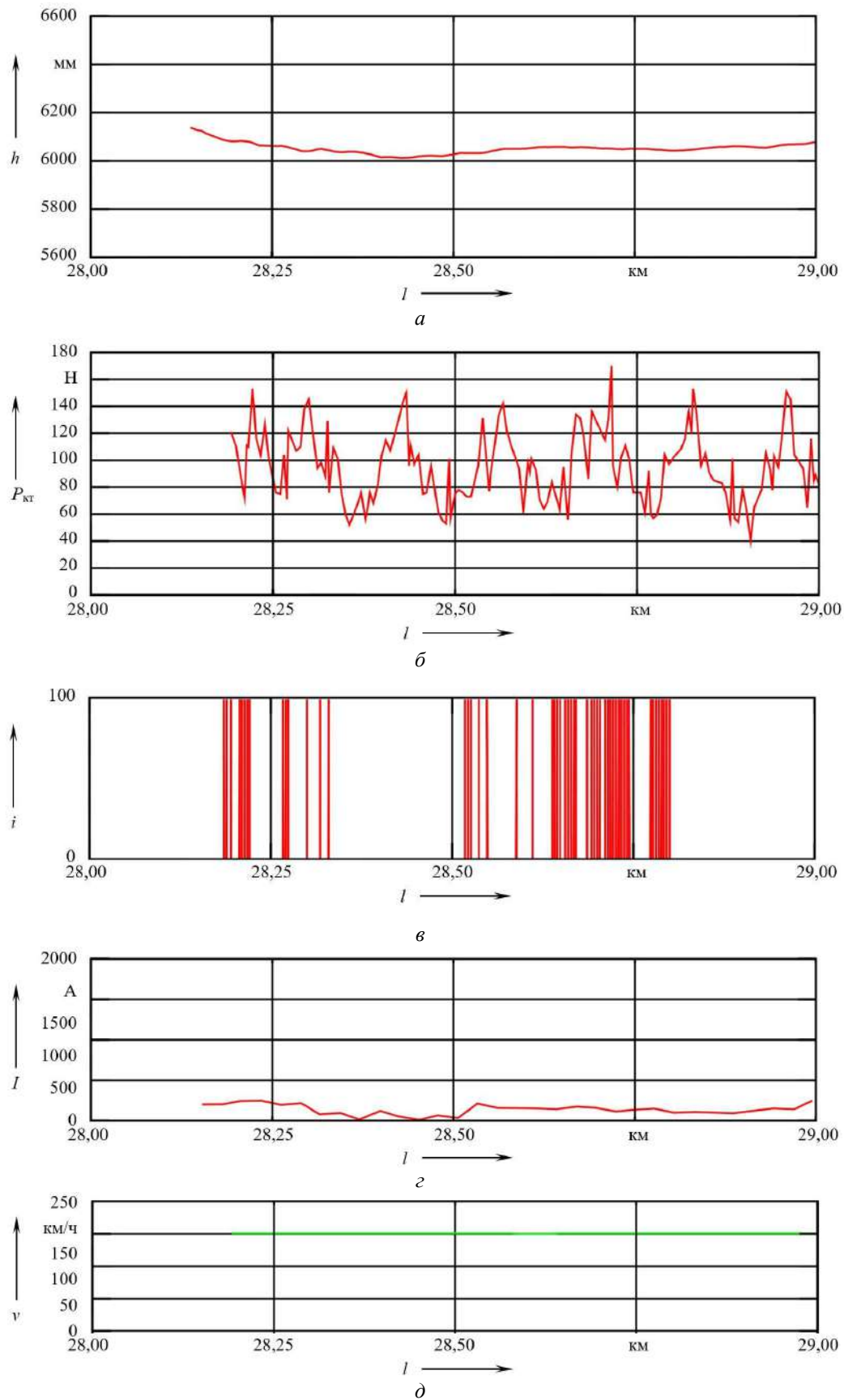


Рисунок 5 – Показания датчиков при проведении экспериментальной поездки:  
а – высотное положение токоприемника  $h$ ; б – контактное нажатие  $P_{кп}$ ; в – моменты искрения  $i$ ;  
г – тяговый ток  $I$ ; д – скорость электропоезда  $v$ ;  $l$  – расстояние, км

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Моделирование целесообразно проводить для одного – двух анкерных участков, расположенных друг за другом, при их взаимодействии с одним или двумя токоприемниками. При моделировании взаимодействия контактной подвески и токоприемников целесообразно использовать значительный опыт по разработке существующих моделей [6 – 8]. К примеру, для анализа взаимодействия контактной подвески и токоприемника используется дифференциальное уравнение, которое позволяет определить влияние конструктивных параметров контактной подвески на качество токосъема:

$$\mu l \frac{d^2 q}{dt^2} + q \mathcal{J}(x) = K(x, t), \quad (1)$$

где  $\mu$  – погонная масса проводов;  $l$  – длина пролета;  $q$  – обобщенная координата системы;  $t$  – момент времени;  $\mathcal{J}(x)$  – функция жесткости контактной подвески, распределенная вдоль пролета;  $K(x, t)$  – сила, действующая на контактную сеть со стороны движущегося токоприемника.

В процессе ресурсных испытаний появляется возможность определения срока службы любого элемента системы токосъема при различных условиях эксплуатации.

Моделирование и прогнозирование на основе трибологической модели износа в конечном результате должны подтвердить выполнение требований по техническому заданию – износу контактного провода и токосъемных элементов токоприемника с учетом влияния таких факторов, как величина контактного нажатия, сила тока, скорость перемещения контакта, физические свойства токосъемных материалов и контактного провода (рисунок 6).

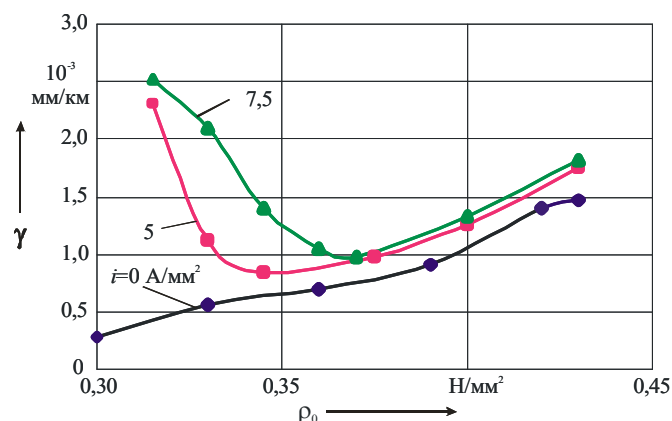


Рисунок 6 – Износные характеристики контактных элементов токоприемников ( $i$  – плотность тока,  $\gamma$  – удельный износ,  $\rho_0$  – удельное нажатие)

Трибологическая модель должна описывать износ пары трения «токосъемные элементы – контактный провод». Модель должна учитывать, что трение – это неравновесный процесс, поэтому основой трибологической модели будут неравновесная термодинамика, характеризующаяся производством энтропии, и теория самоорганизации. Основная формула для производства энтропии системы трения с токосъемом [9] имеет вид:

$$\frac{dS_i^*}{dt} = \frac{(kpv)^2}{\lambda BT^2} + \frac{J_e^2 R}{T}, \quad (2)$$

где  $\frac{dS_i^*}{dt}$  – производство энтропии;  $k$  – коэффициент трения;  $p$  – усилие прижатия;  $v$  – скорость скольжения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности поверхностных слоев трущегося материала;  $B$  – площадь контакта;  $T$  – температура в зоне контакта;  $J_e$  – значение электрического тока;  $R$  – электрическое сопротивление в зоне контакта.

Благодаря свойствам производства энтропии можно определить влияние неконтролируемых параметров ( $k, \lambda, B, T, R$ ) на интенсивность изнашивания с учетом зависимости контролируемых величин ( $p, v, J_e$ ). В источнике [9] показано, что интенсивность изнашивания линейно зависит от производства энтропии, в работе [10] была выведена формула зависимости коэффициента трения от величины электрического тока для эффекта смазывающего действия тока. Формула была подтверждена экспериментально. Дальнейшее развитие этих методов применительно к трению с токоосъемом приведено в работе [11].

Валидация модели взаимодействия проводится на основании накопленного отечественного [12] и зарубежного [13] опыта эксплуатации существующих систем токоосъема.

Блок испытаний системы токоосъема включает в себя изготовление и испытание опытных образцов токоприемника и контактной подвески, проведение их натурных испытаний и верификации разработанной модели. Применение накопленного в ходе испытаний массива данных позволяет произвести расчет стоимости обеспечения энергией электроподвижного состава во время каждой поездки.

При отклонении результатов измерений параметров системы токоосъема, полученных в ходе натурных испытаний, от нормативных значений, регламентированных техническим заданием и нормативными документами, проводится регулировка контактной подвески до получения требуемых результатов, затем соответствующие корректировки вносятся в проекты токоприемника и контактной подвески, а также в математическую модель взаимодействия системы токоосъема, на основе которой проводилось проектирование.

При выполнении верификации разрабатываемой модели системы токоосъема с результатами натурных испытаний переходят к подконтрольной эксплуатации.

Предлагаемый подход к разработке системы токоосъема можно представить в виде логической схемы алгоритма:

$$A_0 \downarrow^{35} A_1 \Pi(\alpha, \beta) [\alpha] \{ \downarrow^{11} A_{11} P_{11} \uparrow^{11} \} [\beta] \{ \downarrow^{12} A_{12} P_{12} \uparrow^{12} \} W(\alpha, \beta) \downarrow^{24} A_{21} \downarrow^{23} \downarrow^{21} A_{22} P_{21} \uparrow^{21} \downarrow^2 A_{23} P_{22} \uparrow^{22} \omega \uparrow^1 \downarrow^{22} \cdot P_2 \uparrow^{23} \omega \uparrow^2 \downarrow^1 P_{24} \uparrow^{24} \downarrow^{34} A_3 \Pi(\gamma, \delta) [\gamma] \{ A_{32} \downarrow^{31} A_{33} P_{31} \uparrow^{31} \} [\delta] \{ A_{34} \downarrow^{32} A_{35} P_{32} \uparrow^{32} \} W(\gamma, \delta) \downarrow^4 A_{36} P_{33} \uparrow^{33} \omega \uparrow^3 \downarrow^{33} \cdot P_{34} \uparrow^{34} \omega \uparrow^4 \downarrow^3 P_{35} \uparrow^{35} S,$$

где  $A_i, P_i$  – функциональные и логические операторы соответственно (см. рисунок 4).

Таким образом, предлагаемый подход к разработке системы токоосъема отличается от существующего тем, что:

на каждом этапе проектирования системы токоосъема учитываются показатели взаимодействия токоприемника и контактной подвески;

корректировка совокупности элементов системы токоосъема происходит одновременно на основе полученных результатов их взаимодействия;

наличие единой информационной системы позволяет вносить изменения в проект на любой стадии, начиная с формирования технического задания и заканчивая подконтрольной эксплуатацией.

Применение предлагаемого подхода позволяет ускорить выявление ошибок и уточнение параметров элементов разрабатываемой системы токоосъема, снизить затраты на создание значительного числа макетов и опытных образцов, объединить стадии проектирования и сократить при этом сроки и трудозатраты по сравнению с традиционным подходом.

Предложенная концепция системы токоосъема представляет собой совокупность механической, электрической и трибологической моделей, позволяющую добиться оптимизации параметров, характеристик и показателей отдельных компонентов по заданным критериям [14]. При этом система демонстрирует максимальную эффективность при расчетных значениях скорости, размеров движения, климатических факторов, что не исключает возможности для ее эксплуатации и за пределами расчетных значений.

## Список литературы

1. Условия и предпосылки получения фактических параметров и характеристик контактных подвесок в ходе проведения линейных испытаний / В. М. Павлов, А. Г. Галкин, А. Н. Смердин [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2007. – № 3 (14). – С. 51–53.
2. Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе : сборник науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – Москва : Интекст, 2010. – 192 с. – Текст : непосредственный.
3. Разработка контактной сети для ВСМ России / В. А. Иванов, Е. В. Кудряшов, А. Г. Галкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2011. – № 1 (1). – С. 16–21.
4. Смердин, А. Н. Совершенствование методики проектирования устройств железнодорожного электроснабжения посредством VR/AR-технологий / А. Н. Смердин, Д. А. Петин. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4 (25). – С. 63–67.
5. Ермачков, Г. Р. Применение нейронных сетей для моделирования взаимодействия контактной подвески и токоприемника / Г. Р. Ермачков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Б. М. Ибраева / Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы, 2018. – Т. 1. – С. 66–72.
6. Численное моделирование динамики токоприемника при взаимодействии с контактной подвеской / Е. В. Авотин, Н. В. Миронос, И. Н. Титух [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 42–45.
7. Тюрнин, П. Г. Изучение влияния параметров контактной подвески на качество токосъема при различных скоростях движения на основе спектрального анализа изменения контактного нажатия / П. Г. Тюрнин, М. Н. Емельянова. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 3. – С. 46–49.
8. Koyama T., Nagao K., Ikeda M. Three-dimensional Simulation of Catenary/Pantograph Dynamic Interaction, *QR of RTRI*, 2021, May, vol. 62, no. 2, pp. 104-109.
9. Гершман, И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 1. – С. 61–70.
10. Gershman I.S., Bushe N.A. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions, *Surface & Coating Technology*, 2004, no. 186, pp. 405-411.
11. Gershman I.S. Formation of Secondary Structures and the Self-Organization Process of Tribosystems during Friction with the Collection of Electric Current, *Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*, Taylor & Francis Group. Boca Raton. London New York, 2006. Ch. 8, pp. 197-230.
12. Филиппов, В. М. Совершенствование математической модели изнашивания элементов контактных пар устройств токосъема электрического транспорта при высокоскоростном движении / В. М. Филиппов, О. А. Сидоров, Н. В. Миронос. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 2–8.
13. Gonzalez J.A. Chover B. Suarez and M. Vazquez. Dynamic analysis using finite elements to calculate the critical wear section of the contact wire in suburban railway overhead conductor rails. *Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2008. vol. 222, pp. 145-157.
14. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – Москва : Маршрут, 2003. – 416 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Pavlov V.M., Galkin A.G., Smerdin A.N., Chertkov I.E., Finichenko V.N. Conditions and prerequisites of acquisition of factual parameters and characteristics of catenaries in the course of

field test operation. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2007, no. 3 (14), pp. 51-53 (In Russian).

2. Tokos'em i tiagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoiannom toke : sbornik nauchnykh trudov OAO «VNIIZhT» [Current collection and traction power supply in high-speed direct current traffic: JSC «VNIIZHT» scientific papers collection]. Moscow, Intext Publ., 2010, 192 p. (In Russian).

3. Ivanov V.A., Kudryashov E.V., Galkin A.G., Kovalev A.A. Development of a contact network for high-speed railways in Russia. *Innovatsionnyi transport – «Innotrans» Journal*, 2011, no. 1 (1), pp. 16-21 (In Russian).

4. Smerdin A.N., Petin D.A. Improvement of railway power supply devices design methods through VR/AR technologies. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2020, no. 4 (25), pp. 63-67 (In Russian).

5. Ermachkov G.R., Smerdin A.N., Golubkov A.S. [Application of neural networks for modeling the interaction of a contact suspension and a pantograph]. *Innovacionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Innovative technologies in transport: education, science, practice : materials of the XLII International Scientific and Practical Conference]. Almaty, 2018, vol. 1, pp. 66-72 (In Russian).

6 Avotin E.V., Mironos N.V., Tituh I.N., Tyurnin P.G. Numerical modelling current collector dynamics when interaction with overhead catenary. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2008, no. 3, pp. 42-45 (In Russian).

7. Tyurnin P.G., Yemel'yanova M.N. Contact pressure spectrum analysis based study of the overhead catenary parameters effect on the current collection quality at various train running speed values. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2014, no. 3, pp. 46-49 (In Russian).

8. Koyama T., Nagao K., Ikeda M. Three-dimensional Simulation of Catenary/Pantograph Dynamic Interaction, *QR of RTRI*, 2021, May, vol. 62, no. 2, pp. 104-109.

9. Gershman I.S., Boucher N.A. Realization of dissipative self-organization of friction surfaces in tribosystems. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 61-70 (In Russian).

10. Gershman I.S., Bushe N.A. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions, *Surface & Coating Technology*, 2004, no. 186, pp. 405-411.

11. Gershman I.S. Formation of Secondary Structures and the Self-Organization Process of Tribosystems during Friction with the Collection of Electric Current, *Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed*, Taylor & Francis Group. Boca Raton. London New York, 2006. Ch. 8, pp. 197-230.

12. Philippov V.M., Sidorov O.A., Myronov N.V. Improving the mathematical model of the wear of the elements of contact pairs of electric current collection devices at high-speed movement. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 2 (42), pp. 2-8 (In Russian).

13. Gonzalez J.A. Chover B. Suarez and M. Vazquez. Dynamic analysis using finite elements to calculate the critical wear section of the contact wire in suburban railway overhead conductor rails. *Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2008, vol. 222, pp. 145-157.

14. Mikheev V.P. *Kontaktnye seti i linii elektroperedachi* [Contact networks and power transmission lines]. Moscow, Route Publ., 2003, 416 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лукьянова Олеся Андреевна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Lukyanova Olesya Andreevna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric Power Supply of Railways», OSTU.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.  
E-mail: ffoxh@mail.ru

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.  
E-mail: ffoxh@mail.ru

## Гершман Иосиф Сергеевич

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Доктор технических наук, отдел «Контактная сеть и токосъем», центр «Электрификация и теплоэнергетика», ВНИИЖТ.

Тел.: + 7 (499) 260-41-11.

E-mail: gershman.iosif@vniizht.ru

## Gershman Iosif Sergeevich

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC «VNIIZHT»).

10, 3rd Mytishchinskaya st., Moscow, 129626, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, department «Contact network and current collection», center «Electrification and heat power engineering», VNIIZHT

Phone: +7 (499) 260-41-11.

E-mail: gershman.iosif@vniizht.ru

## Миронос Николай Васильевич

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, отдел «Контактная сеть и токосъем», центр «Электрификация и теплоэнергетика», ВНИИЖТ.

Тел.: + 7 (499) 260-41-11.

E-mail: mironos.nikolai@vniizht.ru

## Mironos Nikolay Vasilievich

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC «VNIIZHT»).

10, 3rd Mytishchinskaya st., Moscow, 129626, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, department «Contact network and current collection», center «Electrification and heat power engineering», VNIIZHT.

Phone: +7 (499) 260-41-11.

E-mail: mironos.nikolai@vniizht.ru

## Царьков Антон Александрович

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, отдел «Контактная сеть и токосъем», центр «Электрификация и теплоэнергетика», ВНИИЖТ.

Тел.: + 7 (499) 260-41-11.

E-mail: tsarkov.anton@vniizht.ru

## Tsarkov Anton Alexandrovich

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC «VNIIZHT»).

10, 3rd Mytishchinskaya st., Moscow, 129626, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, department «Contact network and current collection», center «Electrification and heat power engineering», VNIIZHT.

Phone: +7 (499) 260-41-11.

E-mail: tsarkov.anton@vniizht.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Концепция разработки системы токосъема для высокоскоростных магистралей / О. А. Лукьянова, И. С. Гершман, Н. В. Миронос, А. А. Царьков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 24 – 36.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lukyanova O.A., Gershman I.S., Mironos N.V., Tsarkov A.A. Concept of current collection system development for high speed lines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 24-36 (In Russian).

УДК 621.336.3

**О. А. Сидоров, А. Н. Тарасов**

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

## ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ ТОКОПРИЕМНИК ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

**Аннотация.** Совершенствование токоприемников электроподвижного состава является актуальной задачей в современных условиях, характеризующихся ростом транспортной нагрузки, развитием технологий и ужесточением экологических требований. Современные токоприемники должны обеспечивать стабильный контакт с контактной подвеской, чтобы минимизировать износ контактных элементов и контактного провода, уменьшить вероятность дугообразования, пережогов и отжигов контактных проводов, снижая тем самым количество отказов и сбоев в работе системы тягового электроснабжения. Особенно актуальны вопросы обеспечения надежной работы системы электроснабжения при запуске в эксплуатацию новой

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

высокоскоростной магистрали (ВСМ), работы по созданию которой в настоящее время начаты и активно ведутся в Российской Федерации. В данной статье выполнен анализ тенденций развития конструкций токоприемников, предназначенных для высоких скоростей движения, выявлены тенденции развития токоприемников для высокоскоростных линий. Разработаны схемные решения двухступенчатого токоприемника, оснащенного устройством блокировки нижней подвижной рамы и предназначенного для эксплуатации как на обычных линиях, так и на высокоскоростных магистралях. Для оценки динамических характеристик данного токоприемника принята математическая модель с сосредоточенными массами, выполнены расчеты, показавшие, что предложенная конструкция двухступенчатого токоприемника обеспечивает качественный токосъем при скоростях движения до 400 км/ч при взаимодействии с контактной подвеской ВСМ, имеющей диапазон высот контактного провода 350 мм. При использовании токоприемника на существующих линиях при скоростях до 200 км/ч он обеспечивает надежный и экономичный токосъем с контактной подвески, имеющей рабочий диапазон высот контактного провода до 1300 мм. Предложена схема автоматического регулирования нажатия верхнего рычага, синхронизированная с системой управления нажимного механизма нижнего рычага. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании токоприемников отечественной линии ВСМ Москва – Санкт-Петербург.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-10188.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, высокоскоростная магистраль, двухступенчатый токоприемник, токосъем, контактное нажатие, диапазон высот контактного провода.

Oleg A. Sidorov, Andrey N. Tarasov

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

## TWO-STAGE PANTOGRAPH OF ELECTRIC ROLLING STOCK FOR HIGH-SPEED LINES

**Abstract.** Improvement of electric rolling stock pantographs is an urgent task in the current conditions characterized by the growth of transport load, development of technologies and toughening of ecological requirements. Modern pantographs should provide stable contact with the catenary to minimize wear of contact elements and contact wire, to reduce the probability of arcing, burns and annealing of contact wires, thus reducing the number of failures and malfunctions in the traction power supply system. Especially relevant are the issues of ensuring reliable operation of the power supply system at the launch of a new high-speed line (HSL), the work on the creation of which is currently initiated and actively carried out in the Russian Federation. In this article the tendencies of development of pantograph designs intended for high speeds are analyzed, the tendencies of development of pantographs for high-speed lines are revealed. The schematic solutions of a two-stage pantograph equipped with a locking device of the lower movable frame and intended for operation both on standard lines and on high-speed lines are developed. To evaluate the dynamic characteristics of this pantograph, a mathematical model with concentrated masses was adopted, and calculations were performed, which showed that the proposed design of the two-stage current collector provides high-quality current collection at speeds up to 400 km/h when interacting with the contact suspension of the high-speed railroad with a contact wire height range of 350 mm. When using the pantograph on existing lines at speeds up to 200 km/h, it provides reliable and economical current collection from the catenary suspension, which has a working range of contact wire heights up to 1300 mm. The scheme of automatic control of the upper lever pressing, synchronized with the control system of the lower lever pressing mechanism, is proposed. The obtained results can be used in designing the pantograph of the domestic line of the Moscow – St. Petersburg High-Speed Railway.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 23-29-10188.

**Keywords:** electric locomotive, high-speed line, two-stage pantograph, current collection, contact push, contact wire height range.

Совершенствование системы тягового электроснабжения является одной из ключевых задач, обозначенных в «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г.» [1]. Эта стратегия направлена на комплексное развитие железнодорожной инфраструктуры, повышение эффективности и безопасности перевозок, а также на внедрение современных технологий и инноваций в транспортную отрасль.

Стратегия предусматривает развитие в Российской Федерации сети высокоскоростных железнодорожных магистралей со скоростями движения до 400 км/ч.

Одним из ключевых аспектов успешной реализации подобных проектов является надежность и эффективность системы тягового электроснабжения, важнейшей частью

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

которой является система токозъема, которая должна обеспечивать надежный, экономичный и экологичный токозъем при высоких скоростях движения. В этих условиях к токоприемникам электроподвижного состава предъявляются высокие требования: минимальная приведенная масса, высокая нагрузочная способность по снимаемому току, способность работать как на высокоскоростных магистралях, так и на обычных линиях.

В первую очередь это касается действующей высокоскоростной линии Москва – Санкт-Петербург, на которой эксплуатируется электропоезд «Сапсан». Контактная подвеска на участках, где реализуются высокие скорости, имеет диапазон изменения высотного положения контактного провода существенно меньше, чем на участках, локализованных в пригородах Москвы и Санкт-Петербурга, где при движении электропоезда «Сапсан» имеют место случаи нарушения стабильности контакта, сопровождающиеся искрением и возникновением опасности термического разрушения токозъемных элементов токоприемника и контактного провода. Поэтому весьма актуальной является задача создания токоприемника, способного работать как при высоких скоростях движения, так и при обычных скоростях в условиях значительного перепада высот контактного провода на указанных выше участках действующей линии Москва – Санкт-Петербург.

Кроме того, аналогичная проблема может возникнуть и при создании высокоскоростных магистралей (ВСМ), когда в периоды испытаний и последующего запуска их в эксплуатацию, скоростной подвижной состав должен будет иметь возможность заходить на обычные линии, прилегающие к высокоскоростной магистрали.

В соответствии с ГОСТ 33944–2016 и ГОСТ Р 58322–2018 контактные подвески обычных и высокоскоростных железных дорог имеют различные рабочие диапазоны высотного положения контактного провода (таблица). Для обычных линий рабочий диапазон составляет 1300 мм [2], а для высокоскоростных – 350 мм [3]. Такая универсальность токоприемников необходима на период запуска в эксплуатацию линии ВСМ, когда скоростной подвижной состав должен иметь возможность заходить на обычные линии, прилегающие к высокоскоростной магистрали. Поэтому разработка таких токоприемников является весьма актуальной задачей.

Высота подвеса контактного провода стандартных и высокоскоростных железных дорог

Название документа	Высота подвеса контактного провода от уровня головки рельса, мм
ГОСТ 33944–2016 «Подвеска железной дороги контактная»	Не менее 5500
	Не более 6800
ГОСТ Р 58322–2018 «Контактная сеть для высокоскоростных железнодорожных линий»	Не менее 5550
	Не более 5900

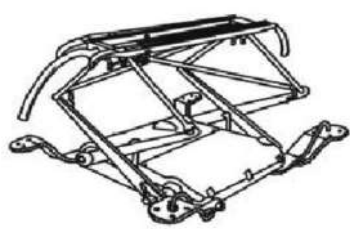
На высокоскоростных линиях токоприемник имеет гораздо меньший рабочий диапазон вертикальных перемещений системы подвижных рам в сравнении с обычными электрифицированными железными линиями, поэтому он может выполняться в виде конструкции, обладающей уменьшенной приведенной массой [4], которая значительно ниже приведенной массы используемых в настоящее время токоприемников.

Для выбора схемных решений нового токоприемника выполнена аналитическая оценка существующих конструкций подвижных рам высокоскоростных токоприемников, применяемых в различных странах.

Одними из первых проектировать специализированный электроподвижной состав для высокоскоростной магистрали стали японские инженеры. Задачу разработки высокоскоростных токоприемников облегчили жесткие нормы, принятые на японской магистрали Синкансэн, касающиеся проектирования контактной сети с ограниченным

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

допуском изменения высоты контактного провода над уровнем головки рельса: 4800 – 5100 мм. Это позволило сократить конструкционные размеры токоприемника и его приведенную массу. На начальном этапе эксплуатации Синкансэн использовались Х-образные токоприемники *PS200A* (рисунок 1, *а*), но впоследствии от них отказались из-за сложной конструкции и значительного аэродинамического шума при высоких скоростях движения. Затем был разработан Т-образный токоприемник телескопического типа (рисунок 1, *б*), который, несмотря на простоту конструкции, имел высокую стоимость и в настоящее время не используется. Позднее были разработаны асимметричные токоприемники *PS207* (рисунок 1, *в*) и *PS208*. В 2011 г. максимальная рабочая скорость высокоскоростных поездов серии *E5* с токоприемником *PS208* достигла 320 км/ч [5].



*а*



*б*



*в*

Рисунок 1 – Японские токоприемники высокоскоростной магистрали Синкансэн: *а* – токоприемник *PS200*; *б* – Т-образный токоприемник; *в* – токоприемник *PS207*

Большой опыт разработки высокоскоростной системы токосъема накоплен французскими специалистами. В 1981 г. была открыта первая высокоскоростная железная дорога во Франции. На этой линии эксплуатируется поезд *TGV*, который является одним из самых скоростных в мире. В 1990 г. поезд *TGV* установил мировой рекорд, развив скорость в 515,3 км/ч [6]. В 2007 г. максимальная скорость испытательного поезда *TGV-V150* достигла 574,8 км/ч [7].

На высокоскоростных поездах *TGV* изначально применялись двухступенчатые токоприемники серии *AMDE* (рисунок 2, *а*). В 1991 г. в целях увеличения скорости движения по высокоскоростным железнодорожным магистралям Франции был разработан асимметричный токоприемник *CX* (рисунок 2, *б*). Он отличается наименьшим размером полоза среди всех известных токоприемников, что привело к значительному уменьшению приведенной массы по сравнению с токоприемниками *AMDE*.



*а*



*б*

Рисунок 2 – Французские высокоскоростные токоприемники: *а* – серии *AMDE*; *б* – серии *CX*

На железных дорогах Великобритании также были реализованы принципы двухступенчатых токоприемников и разработаны токоприемники *Brecknell Willis* (рисунок 3). Эти токоприемники оснащены аэродинамическими крыльями, которые установлены для стабилизации контактного нажатия при высоких скоростях движения.



а



б

Рисунок 3 – Токоприемники фирмы *Brecknell Willis*

К числу лидеров высокоскоростного движения относится и Германия. Введение немецкой высокоскоростной железнодорожной транспортной системы в эксплуатацию в 1991 г. с максимальной скоростью 250 км/ч представляет собой значительный шаг в развитии железнодорожного транспорта. Система *ICE (InterCityExpress)* является одной из наиболее надежных, передовых и комфортабельных в Европе.

На высокоскоростных железнодорожных маршрутах *ICE* применяется асимметричный токоприемник *DSA350SEK* (рисунок 4), который является результатом многолетних исследований по изучению взаимодействия токоприемников с контактной подвеской при одновременном совершенствовании элементов и узлов контактной сети. Благодаря этим усилиям максимальная скорость на немецкой железнодорожной сети была увеличена до 400 км/ч [8].



Рисунок 4 – Токоприемник *DSA350SEK*, разработанный в Германии

В Германии был разработан двухступенчатый токоприемник, который характеризуется способностью обрабатывать изменения высотного положения контактного провода с помощью нижнего основания, в то время как верхняя часть его служит для реагирования на высокочастотные колебания небольшой амплитуды (рисунок 5). Управление работой токоприемника осуществляется с помощью согласующих устройств 3 при помощи двух пневмоцилиндров – 1 и 2.

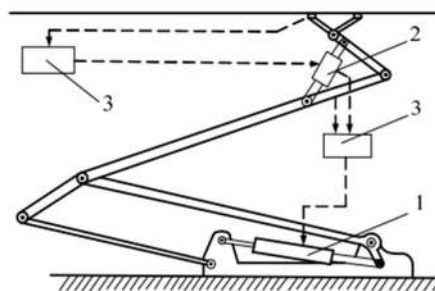


Рисунок 5 – Схема двухступенчатого авторегулируемого токоприемника

В Российской Федерации также проводились работы по созданию скоростных токоприемников. В результате совместной работы ВНИИЖТа с различными научными организациями и после выполнения обширного комплекса опытно-конструкторских работ был разработан авторегулируемый токоприемник пантографного типа ТСП-1м (рисунок 6), который применялся на электропоезде ЭР200 и скоростном электровозе ЧС200. В 2006 г. в рамках экспериментальной поездки была достигнута скорость 262 км/ч, которая в то время являлась рекордной для электрифицированных железных дорог России. Техническая инновация заключалась в наличии двух систем подвижных рам (верхней и нижней). При небольших изменениях высоты контактного провода в пролетах контактной подвески реагировала только верхняя часть токоприемника, а при значительных изменениях высоты,

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

например, при прохождении под искусственными сооружениями, реагировали обе подвижные системы. При этом верхняя система управляла нижней посредством пневмомеханической связи, реализованной с помощью золотников.



Рисунок 6 – Токоприемник ТСП-1м: 1 – изолятор; 2 – кожух механизма подъема; 3 – полз; 4 – подвижные рамы верхней системы; 5 – подвижные рамы нижней системы; 6 – блокировка; 7 – основание

На основании выполненного анализа выявлены следующие основные тенденции развития скоростных токоприемников.

1. Ведущие страны при увеличении скорости движения электроподвижного состава используют асимметричные токоприемники с минимальной приведенной массой и нейтральной аэродинамической характеристикой.

2. Применяются двухступенчатые токоприемники, где основание нижней ступени может регулироваться по высоте с временной фиксацией в определенном диапазоне высот, а верхняя ступень работает в минимальном вертикальном диапазоне, обеспечивая отработку изменений высоты контактного провода и являясь своего рода датчиком для регулирования высоты нижней ступени.

3. В подъемно-опускающих механизмах токоприемников широко применяются управляемые пневматические резинокордные элементы.

4. Механизм подъема и опускания токоприемника должен обеспечивать возможность регулировки статического нажатия на контактный провод как в ручном, так и в автоматическом режимах.

5. Основание токоприемника должно быть оснащено универсальными креплениями для обеспечения его установки на различные типы электроподвижного состава.

6. Приведенная масса системы подвижных рам токоприемника должна быть минимизирована, при этом необходимо обеспечить требуемую поперечную и продольную жесткость. Материалы, используемые для их изготовления, должны обладать хорошей электрической проводимостью.

Среди указанных выше направлений совершенствования конструкций скоростных токоприемников наибольший интерес представляет применение двухступенчатых схем, реализация которых может дать одновременно несколько положительных эффектов: снижение приведенной массы системы подвижных рам, увеличение продольной и поперечной жесткости верхних рычагов, снижение вертикальных аэродинамических сил, действующих на верхний рычаг токоприемника.

В Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» предложена конструкция двухступенчатого токоприемника электроподвижного состава, представленная на рисунке 7.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Предложенный токоприемник работает следующим образом. При эксплуатации токоприемника на обычных электрифицированных железных дорогах одновременно работают нижняя и верхняя подвижные рамы, обеспечивая рабочий диапазон изменений высоты контактного провода 1300 мм.

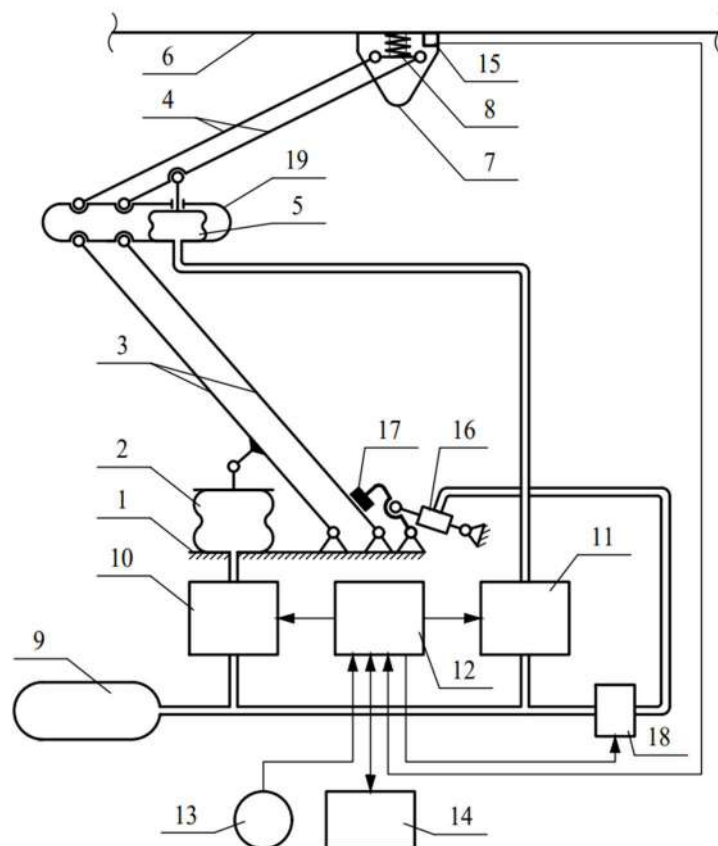


Рисунок 7 – Схема двухступенчатого токоприемника электроподвижного состава ОмГУПС:

- 1 – основание; 2 – механизм подъема и опускания нижней подвижной рамы; 3 – нижняя подвижная рама;
- 4 – верхняя подвижная рама; 5 – механизм нажатия верхней подвижной рамы; 6 – контактный провод;
- 7 – полоз; 8 – каретка; 9 – источник сжатого воздуха; 10 – регулятор давления воздуха в пневмоэлементе подъема и опускания; 11 – регулятор давления в верхнем пневмоэлементе;
- 12 – блок управления; 13 – датчик скорости движения; 14 – пульт машиниста; 15 – датчик контактного нажатия;
- 16 – пневматический привод; 17 – упор-ограничитель; 18 – управляемый клапан; 19 – аэродинамически обтекаемый корпус

Связь между работой нижней и верхней рамы в этом режиме выполнена посредством контроля и синхронизации давления воздуха в нижнем и верхнем пневмоэлементах. На верхних шарнирах нижней подвижной рамы крепится верхняя подвижная рама, оснащенная механизмом нажатия верхней подвижной рамы, выполненным в виде пневматического элемента. Полос закреплен на верхней подвижной раме посредством кареток. Механизм нажатия верхней подвижной рамы установлен в аэродинамически обтекаемом корпусе, закрепленном на нижней подвижной раме. Обтекаемый корпус позволит снизить аэродинамическое сопротивление токоприемника, что особенно важно при движении электроподвижного состава на высоких скоростях.

При поднятии токоприемника сжатый воздух из источника сжатого воздуха подается в механизм подъема и опускания нижней подвижной рамы через регулятор давления пневмоэлемента подъема и опускания и в механизм нажатия верхней подвижной рамы через соответствующий регулятор давления так, чтобы обеспечить синхронную работу нижней и верхней рам. Входы регуляторов давления соединены с блоком управления.

При переходе на контактную сеть высокоскоростной магистрали нижняя подвижная рама вручную с пульта машиниста или автоматически по сигналу датчика скорости движения

блокируется с помощью упора-ограничителя, связанного с пневмоприводом. При этом блок управления увеличивает давление в пневматическом элементе нижней рамы, которая упирается в упор-ограничитель и фиксируется в таком положении, чтобы верхняя рама находилась под углом около  $45^\circ$ . Это обеспечивает работу верхней подвижной рамы в пределах заранее заданного диапазона и позволяет заблокировать перемещения нижней подвижной рамы. Установленный на ползоте токоприемника датчик нажатия связан с регулятором давления пневмоэлемента подъема и опускания нижней рамы и необходим для поддержания установленного нажатия на контактный провод за счет изменения давления в полости механизма нажатия верхней подвижной рамы с помощью регулятора давления, связанного с блоком управления.

При опускании токоприемника машинист подает сигнал на блок управления, который, в свою очередь, через регуляторы давления и управляемый клапан выпускает сжатый воздух из нижнего и верхнего пневмоэлементов и из пневматического привода, что приводит к отведению упора-ограничителя высоты подъема нижней подвижной рамы.

Разработанный токоприемник электроподвижного состава позволяет повысить качество токосъема за счет обеспечения независимой работы верхней подвижной рамы путем фиксации нижней подвижной рамы на определенной высоте, что также позволит снизить приведенную массу токоприемника. Таким образом, с помощью предлагаемого токоприемника электроподвижной состав сможет эффективно работать как на высокоскоростных магистралях, так и на обычных электрифицированных железных дорогах.

Кроме того, при выполнении комплекса испытаний по выбору рационального варианта контактной подвески для линии ВСМ предлагаемый токоприемник позволит оценивать работоспособность системы токосъема при фиксации нижней рамы на различных высотах, что даст возможность оперативно подобрать параметры верхней подвижной рамы и каретки, которая может оснащаться управляемыми упругими элементами при дальнейшем развитии системы автоматического регулирования нажатия.

Для анализа характеристик двухступенчатого токоприемника приняты математические модели с приведенными массами. На этапе оценки работоспособности предлагаемых схемных решений эти модели позволяют с приемлемой точностью моделировать взаимодействие токоприемника и контактной подвески в широком диапазоне скоростей движения, одновременно сокращая затраты времени на необходимые вычисления [9]. На рисунке 8 представлены схемы двухступенчатого токоприемника при обычных и высоких скоростях движения, а также их математические модели с приведенными массами.

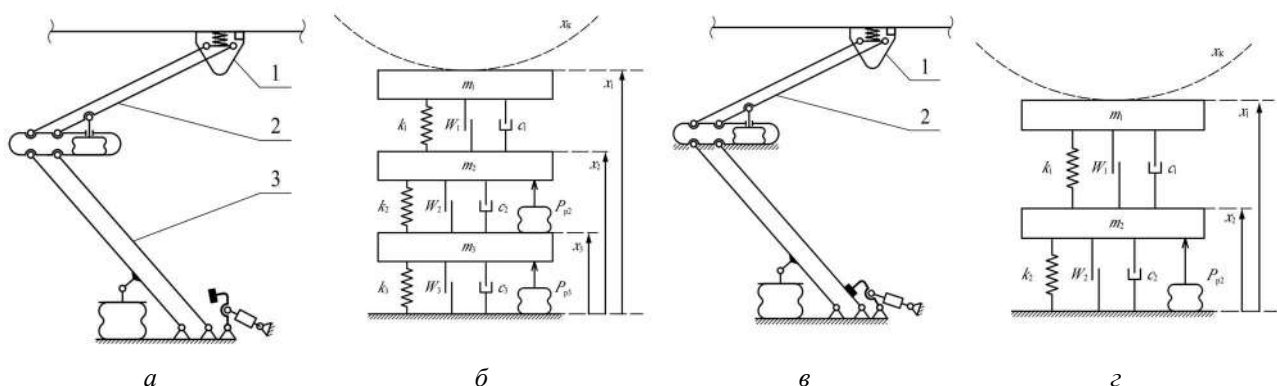


Рисунок 8 – Двухступенчатый токоприемник при обычных скоростях движения (а), его расчетная схема трехмассовой модели (б), двухступенчатый токоприемник при высоких скоростях движения при фиксации нижней подвижной рамы (в) и его расчетная схема двухмассовой модели (г)

Для расчета характеристик двухступенчатого токоприемника при стандартных скоростях применяется трехмассовая модель (рисунок 8, б), которая представляет собой колебательную систему, состоящую из трех приведенных масс: верхний узел 1 токоприемника, верхняя

подвижная рама 2 и нижняя подвижная рама 3. За начало отсчета координат принимается основание токоприемника.

Приведенные массы связаны между собой с помощью элементов, имитирующих жесткость, силы вязкого трения и нелинейные силы сухого трения. На расчетной схеме приняты следующие обозначения:  $x_1$  – высотное положение верхнего узла токоприемника;  $x_2$  – высотное положение верхней подвижной рамы;  $x_3$  – высотное положение нижней подвижной рамы;  $x_k$  – положение контактного провода;  $m_1$  – масса верхнего узла токоприемника;  $m_2$  – приведенная масса верхней подвижной рамы;  $m_3$  – приведенная масса нижней подвижной рамы;  $k_1$  – жесткость кареток;  $k_2$  – жесткость верхней подвижной рамы;  $k_3$  – жесткость нижней подвижной рамы;  $c_1$  – сила вязкого трения в каретке;  $c_2$  – сила вязкого трения в верхней подвижной раме;  $c_3$  – сила вязкого трения в нижней подвижной раме;  $w_1$  – нелинейная сила сухого трения в каретке;  $w_2$  – нелинейная сила сухого трения в верхней подвижной раме;  $w_3$  – нелинейная сила сухого трения в нижней подвижной раме,  $P_{p2}$  – сила, создаваемая механизмом нажатия верхней подвижной рамы;  $P_{p3}$  – сила, создаваемая механизмом подъема и опускания нижней подвижной рамы.

В ходе расчетов приняты следующие допущения:

– вертикальные колебания кузова современного высокоскоростного электроподвижного состава локализуются в пределах 0,005 м, что позволяет принять допущение о том, что основание токоприемника является неподвижным;

– силы ( $P_{p2}$ ) и ( $P_{p3}$ ) в ходе расчетов приняты постоянными, поскольку в кинематической схеме механизма нажатия верхней рамы и механизма подъема и опускания нижней рамы использованы рычажно-тросовые устройства, обеспечивающие стабильность статического нажатия, несмотря на нелинейность характеристик резинокордных пневмоэлементов;

– изгибные колебания рам не учитываются;

– траектория провисания контактного провода принимается в виде жесткой синусоиды, поскольку такой режим является максимально неблагоприятным для токоприемника с точки зрения возникновения резонансных явлений, но необходимым на этапе проверки его работоспособности;

– влияние аэродинамических сил не учитывается;

– токоприемник считается абсолютно жестким в продольном и поперечном направлениях;

– контакт между ползком и контактным проводом представлен в виде виртуальной пружины большой жесткости (50 кН/м);

– нелинейные силы сухого трения были линеаризованы с помощью кусочно-линейной аппроксимации.

Математическая модель токоприемника с приведенными массами может быть описана с использованием уравнений Лагранжа второго рода, которые связывают движение тел в модели с дифференциальными уравнениями второго порядка [10]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_q; \quad q_i \in [x_1, x_2, x_3], \quad (1)$$

где  $q_i$  – обобщенная координата;

$T$  – кинетическая энергия системы;

$\Pi$  – потенциальная энергия системы;

$\Phi$  – диссипативная функция;

$Q_q$  – обобщенная сила по обобщенной координате  $q$ .

После вычисления частных производных кинетической, потенциальной энергий и диссипативной функции составляется система дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - k_k(x_k - x_1) + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_1(x_1 - x_2) + k_2(x_2 - x_3) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + P_{p2}; \\ m_3 \ddot{x}_3 - k_2(x_2 - x_3) + k_3 x_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_3 \dot{x}_3 = w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3) - P_{p2} + P_{p3}. \end{cases} \quad (2)$$

Для расчета токоприемника при высоких скоростях движения используется двухмассовая модель токоприемника (рисунок 8, з). Расчет выполняется аналогично, но с учетом фиксации нижней подвижной рамы, т. е. расчетная схема состоит из двух приведенных масс: верхний узел 1 токоприемника и верхняя подвижная рама 2. После вычислений система дифференциальных уравнений второго порядка примет вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - k_k(x_k - x_1) + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_1(x_1 - x_2) + k_2 x_2 - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_2 \dot{x}_2 = w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2) + P_{p2}. \end{cases} \quad (3)$$

Для проверки эффективности работы предлагаемого двухступенчатого токоприемника выполнено моделирование асимметричного одноступенчатого и предлагаемого двухступенчатого токоприемников в двух режимах (зафиксированной нижней рамой и совместной работе нижней и верхней подвижных рам) в виде моделей с приведенными массами в среде *Matlab/Simulink*.

Для расчетов асимметричного одноступенчатого и предлагаемого двухступенчатого токоприемников с зафиксированной нижней подвижной рамой взяты двухмассовые модели, которые имитируют систему подвижных рам и верхний узел токоприемника (рисунок 9, а).

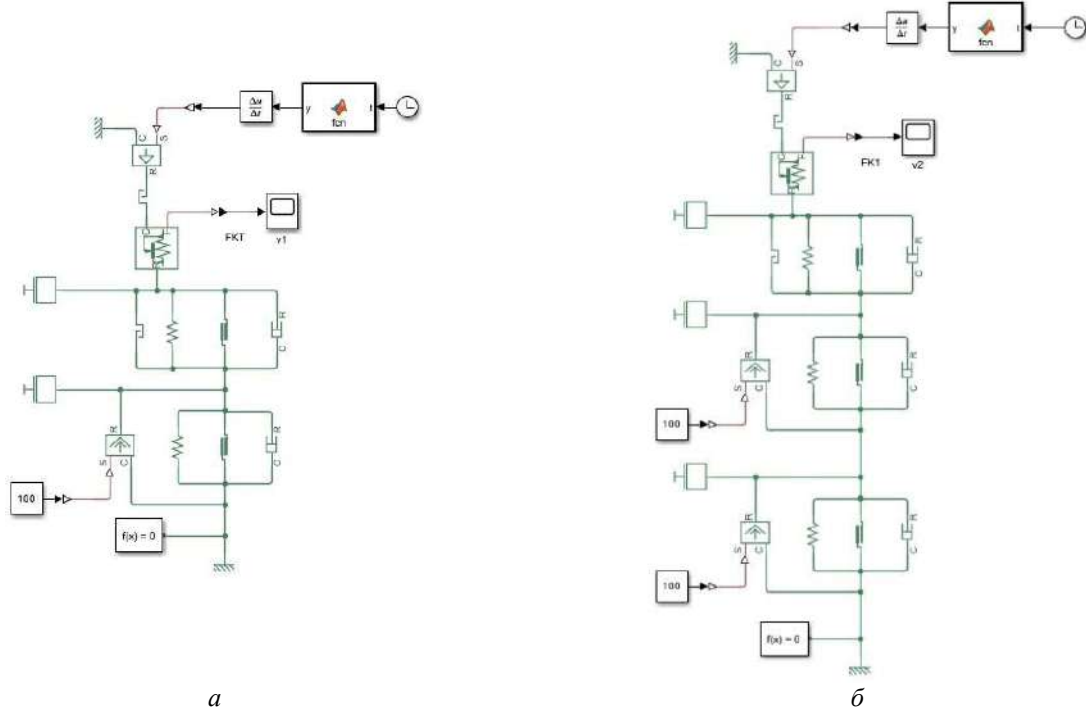


Рисунок 9 – Двухмассовая модель двухступенчатого токоприемника с зафиксированной нижней подвижной рамой в *Matlab/Simulink* (а), трехмассовая модель двухступенчатого токоприемника без фиксации нижней подвижной рамы (б)

Верхний узел токоприемника, в свою очередь, включает в себя полз и каретку. Для расчета двухступенчатого токоприемника с двумя совместно рабочими подвижными рамами была смоделирована трехмассовая модель (рисунок 9, б), состоящая из верхнего узла, верхней и нижней подвижных рам. Контактная подвеска представлена в виде жесткой синусоиды с амплитудой 0,01 м. Увеличение скорости движения электроподвижного состава приводит к

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

росту частоты  $f$  вертикальных колебаний, передающихся от контактной подвески на токоприемник в соответствии с формулой

$$f = v/l, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость движения электроподвижного состава, м/с;

$l$  – длина пролета контактной сети, м.

Диапазон частоты генерируемых подвеской вертикальных колебаний задан от 0 до 2 Гц, что при длине пролета контактной подвески 60 м соответствует скорости движения от 0 до 432 км/ч.

Контактное нажатие на контактный провод в зависимости от частоты вертикальных колебаний показано на рисунке 10. По результатам моделирования видно, что двухступенчатый токоприемник одинаково хорошо работает в обоих режимах при частоте колебаний до 0,9 Гц, но при дальнейшем увеличении частоты при фиксации нижней подвижной рамы разброс контактного нажатия меньше, чем при не зафиксированной подвижной раме. Также видно, что при применении двухступенчатого токоприемника разброс контактного нажатия токоприемника на контактный провод снижается по сравнению с асимметричным одноступенчатым токоприемником.

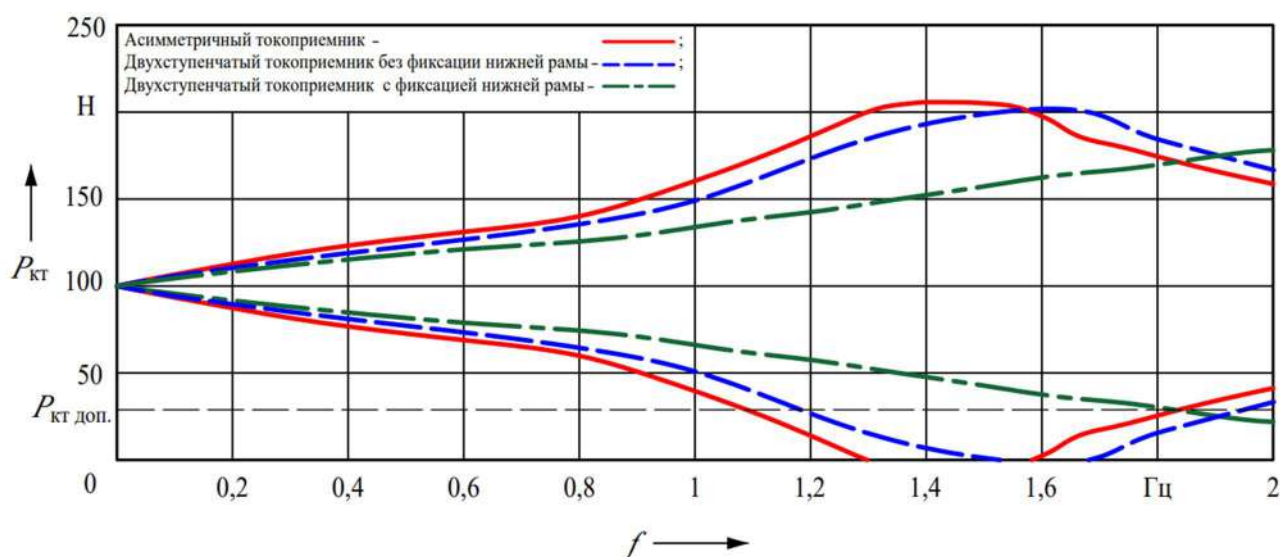


Рисунок 10 – Контактное нажатие на контактный провод асимметричного одноступенчатого токоприемника и двухступенчатого токоприемника в двух режимах работы (с фиксацией нижней рамы и без ее фиксации) в зависимости от частоты вертикальных колебаний, генерируемых контактной подвеской при движении подвижного состава

По данным моделирования можно сделать вывод о том, что предлагаемый токоприемник позволяет сохранить необходимое контактное нажатие на более высоких скоростях движения вплоть до 400 км/ч, что соответствует частоте вертикальных колебаний 1,85 Гц. При дальнейшем росте частоты колебаний наблюдается падение минимального значения контактного нажатия ниже допустимого предела, составляющего 30 % от статического нажатия.

Из этого следует, что предлагаемая двухступенчатая схема с блокировкой нижней рамы позволит обеспечить заданное качество токосъема при использовании его на проектируемой линии ВСМ. На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Выявлены основные тенденции развития зарубежных и отечественных конструкций токоприемников, предназначенных для высоких скоростей движения.

2. В ОмГУПС предложена конструкция авторегулируемого двухступенчатого токоприемника, оснащенного устройством блокировки перемещений нижней рамы для работы как при скорости движения до 200 км/ч по обычной контактной подвеске с диапазоном высотного положения контактного провода 1300 мм, так и при скорости до 400 км/ч при

работе с высокоскоростной контактной подвеской линии ВСМ с диапазоном высотного положения контактного провода 350 мм.

3. На этапе оценки работоспособности принятых схемных решений путем исследования динамических характеристик предлагаемого двухступенчатого токоприемника приняты к использованию математические модели с сосредоточенными массами, реализованные в программной среде *Matlab/Simulink*.

4. По результатам расчета построены зависимости разброса контактного нажатия от частоты вертикальных воздействий со стороны контактной подвески при движении подвижного состава, которые показали, что при скорости движения до 400 км/ч двухступенчатый токоприемник имеет лучшие динамические характеристики по сравнению с одноступенчатыми асимметричными токоприемниками за счет меньшей приведенной массы системы подвижных рам.

5. Предлагаемая конструкция двухступенчатого авторегулируемого токоприемника с устройством блокировки нижней рамы может быть рекомендована для применения на действующей линии Москва – Санкт-Петербург и в системе токосъема проектируемой линии ВСМ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-10188.*

### Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. – Москва, 2008. – 171 с. – Текст : непосредственный.

2. ГОСТ 33944–2016. Подвеска железной дороги контактная. Технические требования и методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 16 с. – Текст : непосредственный.

3. ГОСТ Р 58322–2018. Контактная сеть для высокоскоростных железнодорожных линий. Технические требования и методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 20 с. – Текст : непосредственный.

4. Беляев, И. А. / Токосъем и токоприемники электроподвижного состава / И. А. Беляев, В. П. Михеев, В. А. Шиян. – Москва : Транспорт, 1976. – 184 с. – Текст : непосредственный.

5. Hagiwara Y. Environmentally-friendly aspects and innovative lightweight traction system technologies of the shinkansen high-speed EMUs, *IEEE T Electr Electr*, 2008, no. 3 (2), pp. 176-182.

6. Kobayasi T., Fujihasi Y., Tsuburaya T., Satoh J, Oura Y., Fujii Y. Current collecting performance of overhead contact line–pantograph system at 425 km/h, *Electr Eng Japan*, 1998, no. 124 (3), pp. 73-81.

7. Wang L., Gu H. High-speed rail (HSR) and urban development. Studies on China's high-speed rail new town planning and development, *Springer, Singapore*, no. 2019, pp. 1-19.

8. Song Y., Jiang T., Nàvik P. Geometry deviation effects of railway catenaries on pantograph–catenary interaction: a case study in Norwegian railway system. *Railw Eng Sci*, 2021, no. 29 (4), pp. 350-361.

9. Система автоматического регулирования токоприемника, оснащенного внутрипружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. – № 1. – С. 75–81.

10. Сидоров, О. А. Исследование токоприемников электроподвижного состава, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 10–22.

### References

1. Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation No. 877-r of June 17. Moscow, 2008, 171 p. (In Russian).

2. GOST 33944–2016. The contact suspension of the railway. Technical requirements and methods of control. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 16 p. (In Russian).
3. National Standard 58322–2018. Contact network for high-speed rail lines. Technical requirements and control methods. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 20 p. (In Russian).
4. Belyaev I.A. *Tokosem i tokopriemniki elektropodvizhnogo sostava* [Current collection and pantographs of electric rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1976, 184 p. (In Russian).
5. Hagiwara Y. Environmentally-friendly aspects and innovative lightweight traction system technologies of the shinkansen high-speed EMUs, *IEEE T Electr Electr*, 2008, no. 3 (2), pp. 176-182.
6. Kobayasi T., Fujihasi Y., Tsuburaya T., Satoh J, Oura Y., Fujii Y. Current collecting performance of overhead contact line–pantograph system at 425 km/h, *Electr Eng Japan*, 1998, no. 124 (3), pp. 73-81.
7. Wang L., Gu H. High-speed rail (HSR) and urban development. Studies on China’s high-speed rail new town planning and development, *Springer, Singapore*, no. 2019, pp. 1-19.
8. Song Y., Jiang T., Nāvik P. Geometry deviation effects of railway catenaries on pantograph–catenary interaction: a case study in Norwegian railway system. *Railw Eng Sci*, 2021, no. 29 (4), pp. 350-361.
9. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Mikhailov M.S., Philippov V.M. Automatic control system of the current collector, equipped with intraspring pneumatic elements in carriages. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 75-81 (In Russian).
10. Sidorov O.A., Mikhailov M.S. Research of electric rolling stock pantographs equipped with intra-spring pneumatic elements in the panhead suspension. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 10-22 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

### Тарасов Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-13-46.

E-mail: andr-kz@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Двухступенчатый токоприемник электроподвижного состава для высокоскоростных магистралей / О. А. Сидоров, А. Н. Тарасов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 36 – 48.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sidorov Oleg Asekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

### Tarasov Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Railway power supply», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-46.

E-mail: andr-kz@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O.A., Tarasov A.N. Two-stage pantograph of electric rolling stock for high-speed lines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 36-48 (In Russian).

**А. А. Бакланов, В. П. Клюка, С. А. Мосол**

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

## АНАЛИЗ ПРИЧИН СХОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С РЕЛЬСОВ

**Аннотация.** Цель работы заключается в выяснении причин схода подвижного состава с рельсов, в том числе при движении по стрелочным переводам.

Использованы методы логического анализа, тяговых расчетов, оценки устойчивости движения подвижного состава в рельсовой колее.

Проанализированы силы, действующие на поезд при движении в режиме рекуперативного торможения. Получены соотношения, позволяющие выявить основные факторы, влияющие на движение поезда в этом режиме. На примере конкретного грузового поезда, в котором произошел сход с рельсов багажного вагона на стрелочном переводе в режиме рекуперативного торможения электровоза, и с учетом параметров профиля пути, условий движения поезда найдена тормозная сила электровоза и показано, что она существенно меньше допускаемого значения.

Рассмотрен критерий выжимания подвижного состава под действием больших сжимающих усилий в поезде в виде коэффициента запаса устойчивости колеса против схода с рельса, который оказался существенно больше единицы, это свидетельствует об устойчивом движении в рельсовой колее.

Проанализированы замечания, выявленные при осмотре тележки и колесных пар багажного вагона после схода, которые явно не подтверждают возможность схода из-за падения деталей на путь или иных неисправностей подвижного состава.

Вследствие отсутствия явных причин схода с рельсов багажного вагона наиболее вероятными причинами схода могут быть неисправность пути (стрелочного перевода) либо неблагоприятное сочетание факторов, каждый из которых в отдельности не может привести к сходу, а в совокупности они могут вызвать сход.

Даны общие рекомендации по повышению безопасности движения грузовых поездов.

**Ключевые слова:** грузовой поезд, рекуперативное торможение, стрелочный перевод, причины схода с рельсов.

**Alexander A. Baklanov, Vladislav P. Klyuka, Sergey A. Mosol**

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

## ANALYSIS OF THE REASONS FOR ROLLING STOCK DERAILING

**Abstract.** The purpose of the work is to find out the reasons for rolling stock derailment, including when moving along turnouts.

Methods of logical analysis, traction calculations, and assessment of the stability of rolling stock movement in a rail track were used.

The forces acting on the train when moving in regenerative braking mode are analyzed. Relationships have been obtained that allow us to identify the main factors influencing the movement of the train in this mode. Using the example of a specific freight train in which a baggage car derailed on a turnout switch in the regenerative braking mode of an electric locomotive, and taking into account the parameters of the track profile and the train's moving conditions, the braking force of the electric locomotive was found and shown that it is significantly less than the permissible value.

The criterion for squeezing out rolling stock under the influence of large compressive forces in a train is considered in the form of the safety factor of the wheel against derailment, which turned out to be significantly greater than one, this indicates stable movement in the rail track.

The observations identified during the inspection of the bogie and wheelsets of the baggage car after the derailment are analyzed, which clearly do not confirm the possibility of derailment due to parts falling onto the track or other faults of the rolling stock.

Due to the absence of obvious reasons for the derailment of a baggage car, the most likely causes of the derailment may be a faulty track (switch) or an unfavorable combination of factors, each of which individually cannot lead to a derailment, but together they can cause a derailment.

General recommendations are given to improve the safety of freight trains.

**Keywords:** freight train, regenerative braking, turnout, causes of derailment.

Сход подвижного состава с рельсов представляет очень серьезное нарушение безопасности движения, которое может привести к большим материальным и финансовым затратам,

травмированию и гибели людей. В этой связи выяснение истинных причин схода представляет актуальную задачу и имеет большое значение для предупреждения повторения подобных случаев.

Анализ причин большого количества случаев сходов подвижного состава с рельсов, особенно порожних цистерн, на сети железных дорог показывает, что основная причина сходов не в дефиците прочности пути или вагонов, а в неблагоприятном сочетании горизонтальных и вертикальных сил, которое приводит к выжиманию порожних вагонов или распуру колеи с провалом колесных пар [1], в том числе на стрелочных переводах [2, 3].

При прохождении стрелочных переводов колесными парами подвижного состава, особенно с высокой скоростью [4, 5], возникают большие динамические силы, обусловленные переменной жесткостью рельсов и крестовины по длине перевода, переменностью взаимодействующих с колесами масс стрелочных переводов, а также неровностями пути [6, 7]. Следствием этого является движение колес экипажей по специфическим и присущим только стрелочным переводам траекториям. Кроме того, при входе экипажа на стрелку, выходе из нее, а также при движении по крестовине и закрестовинной кривой могут проходить процессы ударного взаимодействия колес с элементами стрелочного перевода. В работе [7] отмечается, что даже приближенное определение динамических сил взаимодействия экипажа со стрелочными переводами весьма сложно. На стрелочных переводах вертикальные и горизонтальные неровности имеют очень сложные формы, к тому же различные по правому и левому рельсам.

В качестве примера рассмотрим случай схода с рельсов багажного вагона в составе организованного грузового поезда массой 4822 т и длиной состава 264 оси с электровозом 2ЭС6. Поезд прибывал на боковой путь станции в режиме рекуперативного торможения электровоза, сход пятого с головы поезда багажного вагона произошел всеми колесными парами на стрелочном переводе при скорости движения 22 км/ч, крутизна уклона (спуска) профиля пути на месте схода составляет 1,2 ‰.

Сход с рельсов подвижного состава в режиме торможения может происходить в основном по следующим причинам:

- вследствие выдавливания под действием больших сжимающих усилий в поезде;
- из-за неисправности пути;
- из-за неисправности подвижного состава.

При рассмотрении движения поезда авторы исходили из физической сущности этого процесса и руководствовались законом сохранения и превращения энергии, а также вытекающими из него балансами энергии и сил.

Уравнение энергетического баланса движения поезда в режиме торможения на уклоне (спуске) при снижении скорости согласно статье [8] имеет вид:

$$A_p = A_n + A_k - A_{co} - A_{cr}, \quad (1)$$

где  $A_p$  – работа силы торможения;

$A_n$  – изменение потенциальной энергии;

$A_k$  – изменение кинетической энергии;

$A_{co}$  – работа силы основного сопротивления движению;

$A_{cr}$  – работа силы дополнительного сопротивления движению от кривой.

В общем виде схема действующих на поезд сил при рекуперативном торможении на спуске показана на рисунке 1.

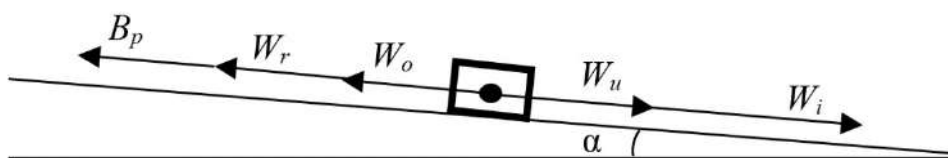


Рисунок 1 – Схема действующих на поезд сил в режиме рекуперативного торможения

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Исходя из уравнения баланса энергии (1) и соответствующего баланса сил, действующих на поезд в режиме рекуперативного торможения, тормозная сила электровоза  $B_p$ , характеризуется выражением [8, 10 – 12]:

$$B_p = W_i + W_u - W_o - W_r, \quad (2)$$

где  $W_i$  – сила от уклона;

$W_u$  – сила инерции;

$W_o$  – сила основного сопротивления движению;

$W_r$  – сила дополнительного сопротивления движению от кривой.

Эти силы, в свою очередь, характеризуются выражениями:

$$W_i = mgi; \quad W_u = mk_u u; \quad W_o = mgw_o; \quad W_r = mgw_r, \quad (3)$$

где  $m$  – масса поезда;

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

$i$  – крутизна уклона;

$k_u$  – коэффициент инерции вращающихся частей;

$u$  – ускорение движения;

$w_o$  – удельное основное сопротивление движению;

$w_r$  – удельное дополнительное сопротивление движению от кривой.

Масса поезда с учетом массы электровоза  $m_d = 200 \text{ т}$  и массы состава  $m_c = 4822 \text{ т}$  составила:

$$m = m_d + m_c = 200 + 4822 = 5022 \text{ т.}$$

Найдем каждую силу по приведенным выше формулам с использованием параметров поезда и его движения.

Сила от уклона крутизной  $i = 1,2 \text{ ‰}$ , обусловленная углом наклона пути  $\alpha$  к горизонтальной поверхности (см. рисунок 1), составила:

$$W_i = 5022 \cdot 9,81 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 59,1 \text{ кН.}$$

Коэффициент инерции вращающихся частей грузового поезда  $k_u$  согласно рекомендациям справочника [12] принимаем равным 1,06. Согласно расшифровке параметров движения поезда ускорение (замедление) движения при рекуперативном торможении и снижении скорости с 28 до 22 км/ч за время 28 с составило:

$$u = \frac{28 - 22}{3,6 \cdot 28} = 0,06 \text{ м/с}^2.$$

Следовательно, сила инерции поезда:

$$W_u = 5022 \cdot 1,06 \cdot 0,06 = 316,9 \text{ кН.}$$

Удельное основное сопротивление движению электровоза под током  $w_o'$  и четырехосных грузовых вагонов с роликовыми подшипниками букс  $w_o''$  на звеньевом пути определяется по формулам [8, 10]:

$$w_o' = 1,9 + 0,01V + 0,0003V^2; \quad (4)$$

$$w_o'' = 0,7 + (3 + 0,1V + 0,0025V^2)/m_{во}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость движения, км/ч;

$m_{во}$  – масса на ось вагона, т.

В рассматриваемом поезде средняя масса на ось вагона  $m_{во} = 4822/264 = 18,3 \text{ т}$ , а скорость движения при сходе вагона  $V = 22 \text{ км/ч}$ . Подставив исходные данные в формулы (4) и (5), получим:

$$w_o' = 1,9 + 0,01 \cdot 22 + 0,0003 \cdot 22^2 = 2,26 \text{ Н/кН};$$
$$w_o'' = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 22 + 0,0025 \cdot 22^2)/18,3 = 0,94 \text{ Н/кН.}$$

Удельное основное сопротивление движению поезда представляет средневзвешенную величину и характеризуется выражением:

$$w_0 = \frac{w'_0 m_n + w''_0 m_c}{m_n + m_c} = \frac{2,26 \cdot 200 + 0,94 \cdot 4822}{200 + 4822} = 0,99 \text{ Н/кН.}$$

Тогда полная сила основного сопротивления движению поезда

$$W_0 = mgw_0 = 4822 \cdot 9,81 \cdot 0,99 \cdot 0,001 = 47,0 \text{ кН.}$$

Таким образом, тормозная сила электровоза в режиме рекуперативного торможения рассматриваемого поезда без учета силы дополнительного сопротивления движению от кривой  $W_r$  согласно выражению (2) составила:

$$B_p = W_i + W_u - W_0 = 59,1 + 316,9 - 46,9 = 329,0 \text{ кН.}$$

Если учесть силу дополнительного сопротивления движению от кривой  $W_r$  при движении по стрелочному переводу, то в соответствии со схемой действующих сил на рисунке 1 и формулой (2) тормозная сила электровоза будет меньше полученного значения 329 кН, и это подтверждается максимальным значением фактической тормозной силы электровоза, указанной ниже.

Согласно работам [10 – 12] для обеспечения устойчивости вагонов от выжимания продольными силами при подталкивании или электрическом торможении локомотивами, находящимися в голове поезда, наибольшие значения сил тяги подталкивающих локомотивов или сил электрического торможения определяются исходя из максимально допустимых продольных сжимающих сил в зависимости от типа и степени загрузки вагонов, находящихся в поезде, с учетом сопротивления движению локомотивов.

Для четырехосных вагонов при нагрузке на ось  $m_{во} > 12$  т допустимая продольная сила составляет  $100 \text{ тс} = 981 \text{ кН}$ , т. е. значительно больше, чем для рассматриваемого поезда. Согласно нормативам, приведенным в источнике [4], для пассажирского вагона в составе поезда максимально допустимая квазистатическая продольная сжимающая сила по условию устойчивости экипажа на рельсах при движении в кривой минимального радиуса 150 м составляет 400 кН, это значительно больше максимальной тормозной силы, реализуемой электровозом 2ЭС6 в режиме рекуперативного торможения при движении на станции. В кривых радиусом 250 м и более такая сила допускается 500 кН.

Одним из критериев выжимания подвижного состава под действием больших сжимающих усилий в поезде является коэффициент запаса устойчивости колеса против схода с рельса, определяемый по формуле [6]:

$$k_y = \frac{\text{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \text{tg} \beta} \cdot \frac{P_b}{P_6} > 1, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол наклона к горизонтальной поверхности рабочей части гребня колеса, для стандартных колес  $\beta = 60^\circ$ ;

$\mu$  – коэффициент трения гребня колеса о внутреннюю грань головки рельса, для стального гребня и рельса  $\mu = 0,25$ ;

$P_b$  – вертикальная нагрузка (сила) от колеса на рельс;

$P_6$  – горизонтальная сила давления гребня колеса на внутреннюю грань головки рельса.

По формуле (6) можно оценить коэффициент запаса устойчивости одного колеса или всего вагона, который для устойчивого движения в рельсовой колее должен быть больше единицы. Необходимо отметить, что разные исследователи (в частности, ученые М. Надаль, Ж. Марье) применяют разные критерии и их численные значения для оценки устойчивости колеса против схода с рельса, но в любом случае их сущность сводится к оценке соотношения вертикальных и боковых сил, действующих в точке контакта гребня колеса с головкой рельса [4, 7].

Учетная масса почтово-багажного вагона  $m_b$  согласно работам [10 – 12] составляет 65 т, а сила тяжести (вес)  $G_b = m_b g = 65 \cdot 9,81 = 637,6 \text{ кН}$ . Поскольку у багажного вагона сошли с

рельсов все четыре колесные пары, то можно предположить, что четыре колеса с одной стороны тележек вползли на рельс, преодолевая вертикальную нагрузку (силу), составляющую половину силы тяжести (веса) вагона –  $P_B = G_B / 2 = 637,6 / 2 = 318,8$  кН.

В качестве горизонтальной силы давления гребней колес на внутреннюю грань головки рельса примем тормозную силу электровоза в режиме рекуперативного торможения. Точные момент времени и место схода колес вагона с рельсов отсутствовали, поэтому для расчетов приняли максимальное значение тормозной силы электровоза 2ЭС6, которое по результатам расшифровки файлов РПМ и кассеты регистрации СН-БЛОК при движении поезда по станции перед сходом составило 192 кН. Следовательно, горизонтальная сила давления гребней колес вагона на внутреннюю грань головки рельса могла достичь  $P_6 = 192$  кН.

Подставив исходные данные в формулу (4), получили:

$$k_y = \frac{\operatorname{tg} 60^\circ - 0,25}{1 + 0,25 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} \cdot \frac{318,8}{192} = 1,718.$$

Поскольку коэффициент запаса устойчивости получился существенно больше единицы, т. е.  $k_y = 1,718 > 1$ , то рекуперативное торможение электровоза 2ЭС6 не могло привести к сходу с рельса колес багажного вагона в составе поезда на станции.

В формуле (6) угол наклона гребня обычно в расчетах принимается равным  $60^\circ$ . Как будет указано в статье далее, при натурном осмотре первой колесной пары комиссией, проводившей расследование случая схода багажного вагона, на гребнях колес первой колесной пары имелся незначительный подрез гребня, который, естественно, влияет на оценку величины рассматриваемого критерия устойчивости. Однако с учетом того, что подрез гребня был менее допустимого предела, этим влиянием можно пренебречь. Поскольку незначительный подрез гребня не ухудшает устойчивости колеса от схода с рельса, так как при этом значение  $k_y$  возрастает.

Таким образом, ни по допускаемым значениям максимальной тормозной силы 981 кН (100 тс), которая значительно больше расчетной тормозной силы 329 кН, ни по коэффициенту запаса устойчивости  $k_y = 1,718$ , который больше единицы, рекуперативное торможение электровоза 2ЭС6 не могло быть причиной схода с рельсов багажного вагона в составе грузового поезда на станции.

На зарубежных железных дорогах при расследовании причин схода подвижного состава с рельсов руководствуются тремя правилами [4]:

первое правило – при сходе с рельсов локомотива (головной части поезда) необходимо искать причину прежде всего в неисправности пути;

второе правило – при сходе с рельсов экипажей в средней или хвостовой части поезда необходимо искать причину в состоянии ходовых частей экипажей или в режиме ведения поезда;

третье правило – при обнаружении на месте схода поезда изломов рельсов и деталей ходовых частей экипажей необходимо искать причину прежде всего в возникновении сверхнормативных сил, вызвавших изломы.

Поскольку в рассматриваемом случае произошел сход с рельсов пятого вагона в головной части поезда, то на основании приведенных правил можно предполагать, что вероятной причиной схода является неисправность пути, т. е. стрелочного перевода.

К расследованию данного случая комиссией ОАО «РЖД» в качестве консультантов привлекались авторы данной статьи. Для осмотра в цехе пассажирского вагонного депо была представлена головная по ходу движения тележка багажного вагона, потерпевшего сход на стрелочном переводе всеми колесными парами при прибытии в составе грузового поезда на станцию. При осмотре тележка находилась без колесных пар, на которых произошел сход (колесные пары сошедшего вагона были предоставлены для осмотра позднее).

Замечания, которые были выявлены при осмотре тележки багажного вагона:

имелись следы сильной течи амортизирующей жидкости из гидравлического гасителя колебаний, расположенного на тележке слева по ходу движения, с попаданием ее как на

корпус гасителя, так и на наружную боковую поверхность боковой продольной балки рамы тележки, а также на поводок по всей длине слева по ходу движения (при этом гидравлический гаситель колебаний справа по ходу тележки никаких следов потеков амортизирующей жидкости не имеет и выглядит исправным);

у пыльника гасителя с левой стороны тележки по ходу движения имелись многочисленные трещины, надрывы и потертости по всей окружности и длине (при этом год изготовления данного пыльника по выявленному клейму 2013 г. и семь выдавленных точек);

при осмотре пыльника гасителя с правой стороны тележки по ходу движения клейма с годом его изготовления выявить не удалось, данный пыльник повреждений не имел;

рама тележки имела следы ударов и трения металла по металлу в разных местах, а также изгибы продольных укороченных балок справа по ходу движения;

надрессорная балка в правой части по ходу движения имела сверху наклеп (след удара), совпадающий с наклепом на внутренней поверхности правой по ходу движения боковой продольной балки;

имелись значительные повреждения деталей тормозной рычажной передачи (в том числе излом проушины их крепления на продольной укороченной балке справа по ходу движения).

Акт комиссионной проверки левого по ходу гидравлического гасителя передней тележки багажного вагона позволил установить разрыв резинового сильфонного уплотнения (гофры), вытекание масла АМГ-10 и, как следствие, несоответствие параметров усилий на сжатие требуемым, что явилось результатом деформации тележки вагона и наклона вагона на правую сторону по ходу движения.

Замечания, выявленные при осмотре колесных пар багажного вагона после схода:

на гребнях всех колесных пар имелись зазубрины и забоины;

толщина гребней колесных пар по результатам обмеров была близка к верхнему пределу допуска (30 мм);

на гребнях колес первой колесной пары имелся незначительный подрез (менее допустимого предела);

на оси первой колесной пары справа имелась круговая потертость, причина появления которой не была установлена;

поверхность катания колесных пар не имела повреждений в виде выщербин, ползунов и наваров.

На основании результатов осмотра предоставленных тележки и колесных пар видимых причин схода из-за падения деталей с подвижного состава на путь не установлено. В связи с данным обстоятельством возможная причина схода вагона с рельсов, связанная с неудовлетворительным техническим состоянием вагона, не могла быть определена однозначно.

По заявлениям членов комиссии ОАО «РЖД», проводившей расследование данного случая схода багажного вагона на станции, состояние железнодорожного пути на месте схода соответствовало требованиям нормативных документов. Однако это вызывает сомнения в части обязательного комиссионного выполнения сразу после схода ряда проверочных действий: промеров железнодорожного пути перед местом схода на расстоянии до 500 м через 2 м (при необходимости – через 1 м), ширины колеи и расположения рельсовых нитей по уровню друг относительно друга (на наличие перекосов) при расследовании этого случая, проверки переводной и закрестовинной кривой стрелочного перевода (где произошел сход) на возвышение наружной нити рельсовой колеи и отсутствие при этом ее обратного возвышения.

Также для объективного расследования данного случая схода необходимы были проверки на соответствие справочных данных по последнему проходу вагона-путеизмерителя и путеизмерительной тележки (по балльности с указанием степеней отступления в текущем содержании железнодорожного пути, рихтовке и уровню рельсовой колеи) и результатов проверок пути бригадиром пути, дорожным мастером, старшим дорожным мастером (начальником участка), результатов последнего комиссионного месячного осмотра стрелочного перевода (на котором произошел сход) начальником станции, комиссионных

осмотров железнодорожного пути при осеннем и весеннем комиссионных осмотрах руководством дистанции пути, комиссиями заместителя начальника дороги по региону и начальника дороги, комиссиями аппарата по безопасности движения в регионе и дороги в ходе проверок, объездов и ревизий. Результаты таких проверок, объездов и ревизий не были предоставлены авторам статьи.

При анализе причин схода вагона с рельсов на стрелочном переводе необходимо прежде всего учитывать такие важные факторы, как плотность прилегания остряка к рамному рельсу и износ его вертикальной поверхности. По заявлениям членов комиссии ОАО «РЖД», проводившей расследование данного случая, стрелочный перевод перед сходом соответствовал требованиям нормативных документов, стрелка при сходе контроль положения остряков не теряла. Однако как по состоянию пути, так и по устройствам СЦБ на данном стрелочном переводе никаких подтверждающих документов об их состоянии комиссией ОАО «РЖД» авторам статьи предоставлено не было. Поэтому нельзя исключить причину схода в неисправности пути.

При этом в головной части поезда находились вагоны с малой загрузкой, а непосредственно перед вагоном, потерпевшим сход, в составе поезда следовал длиннобазный вагон для перевозки легковесных грузов.

При отсутствии видимых причин схода подвижного состава следует рассматривать совокупность факторов, которые по отдельности не могут вызвать сход, но при совместном их действии он может произойти (даже если эти факторы сами по себе находятся в пределах норм, допустимых требованиями нормативных документов). Такими факторами в данном случае могут быть следующие:

толщина гребней колесных пар сошедшего вагона была близка к верхнему пределу допуска (30 мм), что ухудшало вписывание тележек данного вагона при проходе переводной и закрестовинной кривых на стрелочном переводе;

возможное отсутствие возвышения наружной нити рельсовой колеи в переводной и закрестовинной кривых стрелочного перевода, допустимое при скоростях движения до 25 км/ч, вызывает при больших скоростях (на момент схода скорость движения поезда была 27 км/ч) повышенное фактическое непогашенное ускорение вагона от действия увеличенной центробежной силы инерции относительно их расчетных величин;

при сборе схемы рекуперативного торможения электровоза на подъезде к месту схода в процессе сжатия поезда в нем могли возникнуть продольно-динамические силы, вызвавшие динамические колебания кузова данного вагона относительно тележек (боковая качка);

возможные отклонения одной нити рельсовой колеи относительно другой (согласно источнику [9] допустимое отклонение на прямом участке пути – до 6 мм) перед местом схода могли вызвать вынужденные колебания кузова вагона, которые при совпадении частоты этих колебаний с частотой колебаний кузова вагона от продольно-динамической реакции состава могли привести к резонансным колебаниям кузова вагона;

возможное несоответствие параметров гасителей колебаний первой по ходу движения вагона тележки установленным требованиям не ограничило колебания кузова вагона в пределах допустимых норм;

следование в составе двух сцепленных вместе длиннобазных вагонов с легковесным грузом при неудовлетворительном вписывании в переводную и закрестовинную кривые стрелочного перевода с совпадением возможных указанных выше факторов могло привести к выдавливанию данного вагона из колеи и послужить вероятной причиной его схода с рельсов.

Кроме того, возможные наиболее опасные сочетания параметров, которые могли бы привести к сходу багажного вагона на стрелочном переводе, приведены в п. 53 нормативного документа [9]: «...Запрещается эксплуатировать на железнодорожных путях общего и необщего пользования стрелочные переводы и глухие пересечения, у которых выявлена одна из следующих неисправностей:

- 1) разъединение стрелочных остряков и подвижных сердечников крестовин с тягами;

2) отставание остряка от рамного рельса, подвижного сердечника крестовины от усовика на 4 мм и более, измеряемое у остряка и сердечника тупой крестовины против первой тяги, у сердечника острой крестовины – в острие сердечника при запертом положении стрелки;

3) в противошерстном направлении (от остряков до крестовины) при глубине выкрашивания остряка более 3 мм и длине выкрашивания:

- на главных железнодорожных путях – 200 мм и более;
- на приемоотправочных железнодорожных путях – 300 мм и более;
- на прочих станционных железнодорожных путях – 400 мм и более;

4) в пошерстном направлении (от крестовины в сторону дефектного остряка) при выкрашивании остряка в сечении 0 – 20 мм, глубиной более 12 мм при длине выкрашивания остряка:

- на главных железнодорожных путях – 200 мм и более;
- на приемоотправочных железнодорожных путях – 300 мм и более;
- на прочих станционных железнодорожных путях – 400 мм и более;
- при образовании цепочки из отдельных дефектов в общую длину дефекта включаются смежные дефекты, расположенные на расстоянии, меньшем длины наименьшего из двух смежных дефектов;

5) понижение остряка против рамного рельса и подвижного сердечника против усовика на 2 мм и более, измеряемое в сечении, где ширина головки остряка или подвижного сердечника поверху 50 мм и более;

6) расстояние между рабочей гранью сердечника крестовины и рабочей гранью головки контррельса менее 1472 мм;

7) расстояние между рабочими гранями головки контррельса и усовика более 1435 мм;

8) излом остряка или рамного рельса;

9) излом крестовины (сердечника, усовика или контррельса);

10) разрыв контррельсового болта в одноболтовом или обоих в двухболтовом вкладыше.

Запрещается эксплуатация стрелочных переводов с шириной колеи более 1546 мм и менее 1512 мм ...».

Таким образом, неисправности стрелочных переводов, которые могут привести к сходу подвижного состава, характеризуются так:

- разъединение стрелочных остряков и подвижных сердечников крестовин с тягами;
- отставание остряка от рамного рельса, подвижного сердечника крестовины от усовика более нормы;
- выкрашивание остряка более нормы;
- понижение остряка против рамного рельса и подвижного сердечника против усовика более нормы;

– критические расстояния в стрелочном переводе (между рабочей гранью сердечника крестовины и рабочей гранью головки контррельса, между рабочими гранями головки контррельса и усовика) не соответствуют нормам;

- изломы остряка или рамного рельса, крестовины (сердечника, усовика или контррельса);
- разрывы контррельсовых болтов;
- ширина колеи более 1546 мм и менее 1512 мм.

Для оценки возможных причин схода рассмотрим действие сил на багажный вагон при его сходе. Действие сил при следовании по стрелочному переводу условно можно разделить на три этапа.

1. При следовании длиннобазного и багажного вагонов перед стрелкой на прямом участке пути. На оба вагона (рисунок 2) действуют силы веса  $P$  и силы реакции  $H$  от пути, приложенные вертикально.

В данном контексте сила реакции  $H$  от пути рассматривается лишь как противодействие силе веса  $P$ , а силу реакции от пути, перпендикулярную поверхностям катания рельсов и поверхности гребня колеса по касательной к ней, можно не учитывать и на схеме действия сил не указывать. Поскольку на прямом участке пути перед стрелкой эта сила близка к нулю

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

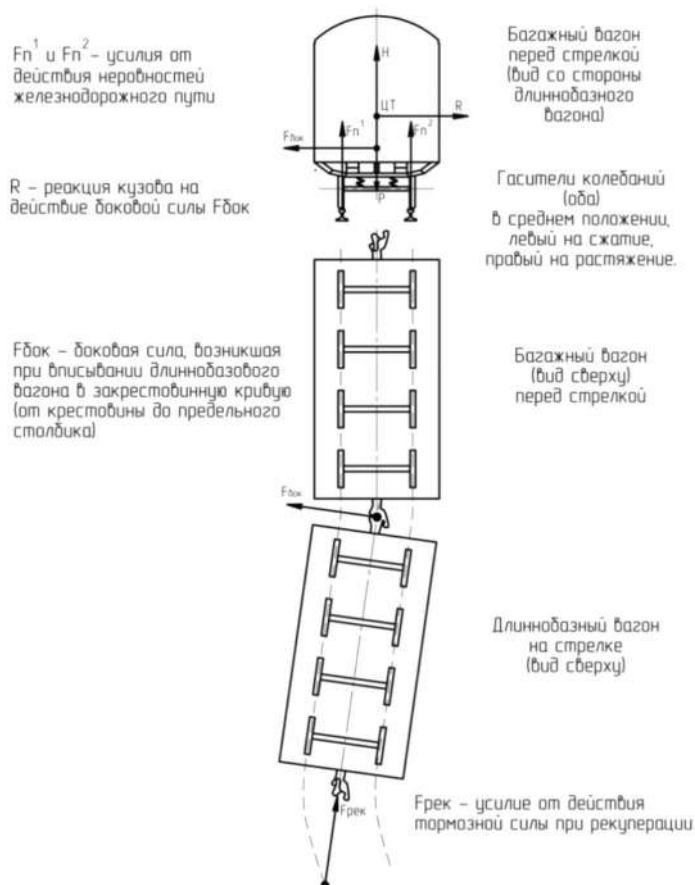


Рисунок 2 – Действие сил при следовании багажного вагона по стрелочному переводу

из-за установки гребней колесных пар вагонов относительно боковых поверхностей головок рельсов в положение максимального перекоса тележек (т. е «в елочку») под действием тормозной силы электровоза в режиме рекуперации переводу и взаимной компенсации возникающих усилий в гребнях колес и головок рельсов. Так как величины и направления усилий давления гребней колес вагонов поезда на головки рельсов (и, соответственно, силы реакции от пути на гребни колес) при этом носят случайный характер, точно определить их невозможно и авторы статьи сочли допустимым их не учитывать.

В горизонтальной плоскости к автосцепке длиннобазного вагона (см. рисунок 2) со стороны локомотива постоянно приложена тормозная сила  $F_{рек}$  при действии рекуперативного торможения электровоза (часть этой силы за минусом использованной на торможение в данном случае длиннобазного вагона приложена к

автосцепке багажного вагона со стороны локомотива и длиннобазного вагона). При этом на оба вагона могут действовать разные силы –  $F_n^1$  и  $F_n^2$  – от действия на ходовые части вагонов неровностей пути (амплитуды этих сил при условии нормального действия гасителей колебаний багажного вагона находятся в пределах допустимых норм).

2. Впередиидущий длиннобазный вагон входит в зону стрелочного перевода, и передняя его тележка следует по переводной кривой (от острьяков до крестовины). Багажный вагон находится перед стрелкой. Длиннобазный вагон вписывается в переводную кривую, возникает боковая сила  $F_{бок}$  от действия этой кривой, которая через гребни колесных пар его передней тележки и автосцепки передается на багажный вагон, вызывая прижатие гребней колесных пар его передней тележки к левой по ходу нити рельсовой колеи.

3. Передняя тележка длиннобазного вагона входит в закрестовинную кривую, передняя тележка багажного вагона входит на острьяк и рамный рельс переводной кривой.

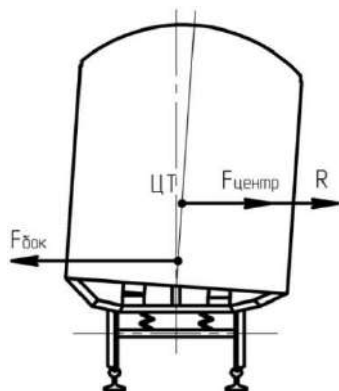


Рисунок 3 – Действие сил при сходе вагона на стрелочном переводе

Длиннобазный вагон от действия боковых сил на гребни колесных пар передней по ходу тележки в закрестовинной кривой (эти силы поменяли направление на противоположное) передает возникающее усилие через автосцепки на багажный вагон. При этом результирующая сила  $F_{бок}$  (рисунок 3) стремится вернуть оба вагона в исходное состояние, соответствующее движению обоих вагонов по прямому пути.

Возникающая от действия силы  $F_{бок}$  сила реакции  $R$ , приложенная к центру тяжести кузова, стремится наклонить кузов багажного вагона в левую сторону по ходу движения (вызывая начало сжатия левого гасителя колебаний и начало растяжения правого). Наклон кузова багажного вагона

начинается при входе его на стрелку (когда впередиидущий длиннобазный вагон проходит зону крестовины стрелочного перевода). К действию силы реакции  $R$  добавляется центробежная сила  $F_{\text{центр}}$  на кузов вагона от действия кривой (начало остряка).

При этом от действия сил  $F_{\text{бок}}$  с одной стороны и суммарного действия сил  $R + F_{\text{центр}}$  возникает опрокидывающий момент, действующий на кузов багажного вагона (см. рисунок 3). Происходят максимальное сжатие правого по ходу движения гасителя колебаний и максимальное растяжение левого гасителя, максимальное сжатие пружин рессорного подвешивания левой стороны передней по ходу тележки багажного вагона с обезгруживанием колес ее колесных пар на правой по ходу нити рельсовой колеи, перекачиванием этих колес через рельс и сходом их с рельсов (с провалом левых по ходу движения колес внутрь колеи). Сход колес задней по ходу движения тележки происходит аналогичным образом.

По мнению авторов статьи, в рассмотренном случае при явном отсутствии неисправностей подвижного состава наиболее вероятной причиной схода багажного вагона могла быть неисправность пути.

По мнению авторов статьи, в рассмотренном случае при явном отсутствии неисправностей подвижного состава наиболее вероятной причиной схода багажного вагона могла быть неисправность пути. Эта версия получила дополнительное подтверждение в ходе разбора данного случая с участием работников аппарата управления Западно-Сибирской железной дороги: оказалось, что стрелочный перевод станции, на котором произошел сход багажного вагона, до данного случая из-за неисправностей за короткий срок дважды закрывался для движения поездов и маневровой работы. Рассмотренный случай схода с рельсов багажного вагона в составе организованного поезда показывает, что с целью выяснения истинных причин схода необходимо было проводить тщательное расследование обстоятельств происшествия на основании распоряжения [13]. Детальное обследование стрелочного перевода, на котором произошел сход с рельсов багажного вагона, позволило бы установить, насколько он соответствовал предъявляемым требованиям [1 – 3, 9] прежде всего по установленной на нем скорости движения, наличию дефектов и т. п.

Таким образом, сход с рельсов багажного вагона в составе организованного поезда на станции не мог произойти по причине выжимания в режиме рекуперативного торможения из-за небольших тормозных сил электровоза 2ЭС6, существенно меньших допускаемых значений. Также не было очевидных причин схода багажного вагона из-за падения деталей на путь или иных неисправностей подвижного состава. Вследствие отсутствия явных причин схода с рельсов багажного вагона наиболее вероятными причинами схода могли быть неисправность пути (стрелочного перевода) либо неблагоприятное сочетание факторов, каждый из которых в отдельности не может привести к сходу, а в совокупности они могут вызвать сход.

Из анализа приведенных данных можно назвать наиболее общие направления повышения безопасности движения грузовых поездов:

улучшение технического состояния подвижного состава и пути, применение безопасных режимов вождения поездов с целью исключения неблагоприятного соотношения горизонтальных и вертикальных сил, способствующих возникновению в поезде недопустимых продольных динамических сжимающих и растягивающих сил;

повышение сопротивления рельсовой колеи распыру колесных пар и вползанию гребня колеса для предотвращения раскантовки рельсов на участках с костыльным скреплением их со шпалами (применение противораспорных подкладок).

### *Список литературы*

1. Глюзберг, Б. Э. Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам / Б. Э. Глюзберг. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2023. – Т. 82. – № 3. – С. 198–211.

2. Бржезовский, А. М. Актуализация норм допускаемых скоростей движения подвижного состава на инфраструктуре ОАО «РЖД» / А. М. Бржезовский, Б. Э. Глюзберг,

- И. В. Смелянский. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 6. – С. 28–35.
3. Расчет долей дефектных элементов стрелочной продукции / А. А. Локтев, И. В. Шишкина, В. И. Ткаченко, В. В. Артемьева. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 88–92.
4. Лысюк, В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов / В. С. Лысюк. – Москва : Транспорт, 2002. – 215 с. – Текст : непосредственный.
5. Волошко, Ю. Д. Как работают стрелочные переводы под поездами / Ю. Д. Волошко, А. Н. Орловский. – Москва : Транспорт, 1987. – 120 с. – Текст : непосредственный.
6. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – Москва : Транспорт, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
7. Вериги, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериги, А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1986. – 659 с. – Текст : непосредственный.
8. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов / А. А. Бакланов. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2005. – № 6. – С. 32–34.
9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации / Утв. приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. – Москва, 2022. – 523 с. – Текст : непосредственный.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.
11. Правила тяговых расчетов для поездной работы / Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867р. – Москва, 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.
12. Астахов, П. Н. Справочник по тяговым расчетам / П. Н. Астахов, П. Т. Гребенюк, А. И. Скворцова. – Москва : Транспорт, 1973. – 256 с. – Текст : непосредственный.
13. Распоряжение ОАО «РЖД» от 20.07.2021 № 1560/р “Об утверждении Положения об организации расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта на инфраструктуре железнодорожного транспорта, принадлежащей ОАО «РЖД»”. – Москва, 2021. – 17 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Gluzberg B.E. System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2023, vol. 82, no. 3, pp. 198-211 (In Russian).
2. Brzhezovskiy A.M., Glyuzberg B.E., Smelyanskiy I.V. Actualization of the norms of permissible speeds for the movement of rolling stock on the infrastructure of Russian Railways. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2017, no. 6, pp. 28-35 (In Russian).
3. Loktev A.A., Shishkina I.V., Tkachenko V.I., Artemyeva V.V. Calculation of shares of switch production defective parts. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 1 (76), pp. 88-92 (In Russian).
4. Lysyuk V. S. *Prichiny i mekhanizm skhoda koleasa s rel'sa. Problema iznosa koleas i rel'sov* [Causes and mechanism of wheel derailment. Wheel and rail wear problem]. Moscow, Transport Publ., 2002, 215 p. (In Russian).
5. Voloshko Yu.D., Orlovskiy A.N. *Kak rabotayut strelochnyye perevody pod poyezdami* [How do switches work under trains]. Moscow, Transport Publ., 1987, 120 p. (In Russian).
6. Vershinskiy S.V., Danilov V.N., Chelnokov I.I. *Dinamika vagona* [Car dynamics]. Moscow, Transport Publ., 1978, 352 p. (In Russian).
7. Verigo M.F., Kogan A.Ya. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [Interaction between track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986, 659 p. (In Russian).
8. Baklanov A.A. The energy balance of the movement to solve problems of reducing power consumption for train traction. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi*

*sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection, 2005, no. 6, pp. 32-34 (In Russian).*

9. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 № 250, Moscow, 2022, 523 p. (In Russian).

10. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Traction rules for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p. (In Russian).

11. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* (Traction rules for train operation), approved by the order of JSC «RZD» from 12.05.2016 № 867r. Moscow, 2016, 515 p. (In Russian).

12. Astakhov P.N., Grebenyuk P.T., Skvortsova A.I. *Spravochnik po tyagovym raschetam* [Handbook of traction calculations]. Moscow, Transport Publ., 1973, 256 p. (In Russian).

13. Order of JSC «Russian Railways» dated 20.07.2021 No. 1560/r «On Approval of the Regulations on the Organization of Investigation and Accounting of Transport Accidents and Other Events related to violations of the Rules of Traffic Safety and Operation of Railway Transport on the railway transport infrastructure owned by JSC Russian Railways». Moscow, 2021, 17 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

### Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 628-78-87.

E-mail: vklyuka@mail.ru

### Мосол Сергей Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 613-08-01.

E-mail: bam1979-2005@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Анализ причин схода подвижного состава с рельсов / А. А. Бакланов, В. П. Клюка, С. А. Мосол. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 49 – 60.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Rolling stock of electric Railways», OSTU.

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

E-mail: aleksbakl@mail.ru

### Klyuka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department «Wagons and Carriage Facilities», OSTU.

Phone: +7 (913) 628-78-87.

E-mail: vklyuka@mail.ru

### Mosol Sergey Amdreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior lecturer of the department «Wagons and Carriage Facilities», OSTU.

Phone: +7 (913) 613-08-01.

E-mail: bam1979-2005@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A.A., Klyuka V.P., Mosol S.A. Analysis of the reasons for rolling stock derailing. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 49-60 (In Russian).

**О. В. Кубкина, А. И. Осипова**

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

## МИНИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

**Аннотация.** Существенное значение в сокращении продолжительности послеаварийного режима работы имеет система автоматического повторного включения (АПВ) высоковольтного выключателя питающей линии. В ряде случаев имеет место необходимость максимального сокращения времени задержки АПВ, т. е. реализация быстродействующего АПВ (БАПВ). Для электроподвижного состава железных дорог, энергоснабжение которого осуществляется нерезервированными линиями контактной сети, наличие быстродействующего автоматического повторного включения представляется наиболее актуальным. Недопустимое увеличение времени задержки приводит к остановкам поездов и значительным издержкам. Вместе с тем одним из основных критериев при определении минимально допустимого времени задержки является снижение вероятности повторного короткого замыкания (развития аварийного режима). Известные алгоритмы АПВ предусматривают увеличение задержки, определяемое необходимостью деионизации среды в месте короткого замыкания при наличии дуги и температурой нагрева проводов.

Целью работы является оценка возможности реализации БАПВ с учетом результатов функционального контроля устройств релейной защиты (УРЗов) в части выявления ложных и излишних срабатываний, разработка алгоритма БАПВ.

В соответствии со статистическими данными наибольшее число неверных действий устройств релейной защиты тяговой сети приходится на ложные и излишние срабатывания [1, 2]. В статье рассмотрен метод контроля правильности функционирования УРЗов, основанный на логическом анализе состояния измерительных элементов в момент короткого замыкания. Показана возможность идентификации ложных и излишних срабатываний в режиме реального времени. При выявлении соответствующих неверных действий УРЗов предлагается корректировка действий системы автоматического повторного включения по полученным результатам.

В статье приводится обоснование возможности реализации быстродействующего автоматического повторного включения по результатам анализа реакции устройств релейной защиты тяговой сети переменного тока на реальное короткое замыкание. Предлагается блок-схема алгоритма БАПВ.

**Ключевые слова:** устройство релейной защиты, модель функционирования, правильность функционирования, ложное срабатывание, быстродействующее автоматическое повторное включение.

**Olga V. Kubkina, Anna I. Osipova**

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

## MINIMIZING TIME AUTOMATIC RECLOSING

**Abstract.** For electric rolling stock of railways, the power supply of which is carried out by non-redundant lines of the contact network, the presence of high-speed automatic reclosing seems to be the most relevant. An unacceptable increase in delay time leads to train stops and significant costs.

The purpose of the work is to assess the possibility of implementing a high-speed automatic reclosing of the high-voltage circuit breaker of the power line of the electric traction network, taking into account the results of functional control of relay protection devices in terms of detecting false and excessive actuations, developing an algorithm for high-speed automatic reclosing.

According to the statistical data, the largest number of incorrect actions of the traction network relay protection devices are false and excessive actuations [1, 2]. The article discusses the method of monitoring the correct functioning of relay protection devices, based on a logical analysis of the state of measuring elements at the time of a short circuit. The possibility of identifying false and unnecessary actuations in real time is shown. If corresponding incorrect actions of relay protection devices are detected, correction of actions of the automatic reclosing system based on the obtained results is proposed.

The article provides a justification for the possibility of implementing fast-acting automatic reclosing based on the results of the analysis of the reaction of AC traction protection devices to a real short circuit. A flowchart of a high-speed automatic reclosing algorithm is provided.

**Keywords:** relay protection device, operating model, correct functioning, false actuation, high-speed automatic reclosing.

Для ряда потребителей критичным является время восстановления электроснабжения после срабатывания релейной защиты. Сокращение времени восстановления наряду с другими системами автоматики, обеспечивается применением автоматического повторного включения. В частности, в системах тягового электроснабжения задержки в восстановлении электроснабжения вызывают технологические проблемы, могут привести к развитию аварийного режима, выходу из строя оборудования [3 – 5].

Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем теряет синхронизацию с сетью при временной задержке автоматического повторного включения, превышающей 0,2 – 0,3 с. Специфика работы схемы электроподвижного состава переменного тока для обеспечения сохранения тягового режима обуславливает временную задержку автоматического повторного включения в пределах 0,5 – 0,7 с. Кроме того, при формировании алгоритма быстродействующего автоматического повторного включения следует принимать во внимание возможность наличия электрической дуги в месте короткого замыкания и температуру контактного провода, нагретого током короткого замыкания. Эти факторы обуславливают корректировку времени задержки автоматического повторного включения в сторону увеличения. При этом время задержки превышает 0,7 с. В этом случае сохранение тягового режима электроподвижного состава с выпрямительно-инверторным преобразователем после срабатывания релейной защиты становится проблематичным, что может привести к остановке поезда [6]. Тяжесть последствий и величина издержек в результате успешного АПВ с временем задержки, превышающем время сохранения тягового режима ЭПС, определяются весом поездов и профилем пути. Если остановившийся состав не может самостоятельно тронуться, требуется вспомогательный электровоз.

Как уже отмечалось выше, преобладающее число неверных действий устройств релейной защиты приходится на ложные (защита сформировала команду на отключение выключателя при отсутствии аварийного режима) и излишние (защита сформировала команду на отключение выключателя при коротком замыкании за пределами защищаемой зоны) срабатывания. На этот вид неверных действий приходится до 70 – 80 % от их общего числа.

С точки зрения минимизации времени задержки автоматического повторного включения интерес представляют ложные срабатывания. Определение факта ложного срабатывания в режиме реального времени допускает реализацию автоматического повторного включения без задержки по времени. Статистические данные позволяют предположить возможность до 70 % АПВ без выдержки времени.

Представляется возможной реализация быстродействующего автоматического включения по результатам диагностирования устройств релейной защиты в режиме реального времени при выявлении факта ложного срабатывания.

Для принятия решения о допустимости применения автоматического повторного включения без выдержки времени необходимо рассмотрение следующих вопросов.

Во-первых, необходимо наличие методов и моделей диагностирования устройств релейной защиты в режиме реального времени при реагировании на реальное короткое замыкание, позволяющих идентифицировать ложные срабатывания при коротком замыкании в любой точке межподстанционной зоны.

Во-вторых, с учетом высокой ответственности функции автоматического повторного включения необходимо оценить эффективность контроля правильности функционирования УРЗов с точки зрения выявления ложных срабатываний.

Наличие методов и моделей контроля, его высокая эффективность определяют возможность корректировки алгоритма автоматического повторного включения.

Представляемые авторами методы и модели контроля основаны на логической обработке состояния функциональных элементов релейной защиты в режиме реального времени.

Релейная защита линий, питающих контактную сеть, представляет собой функционально избыточное, восстанавливаемое, дискретное устройство. В общем случае в нее входят

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

элементы измерения ( $\mathcal{E}_и$ ), образующие измерительную часть и элементы логические ( $\mathcal{E}_л$ ), образующие логическую часть (рисунок 1).

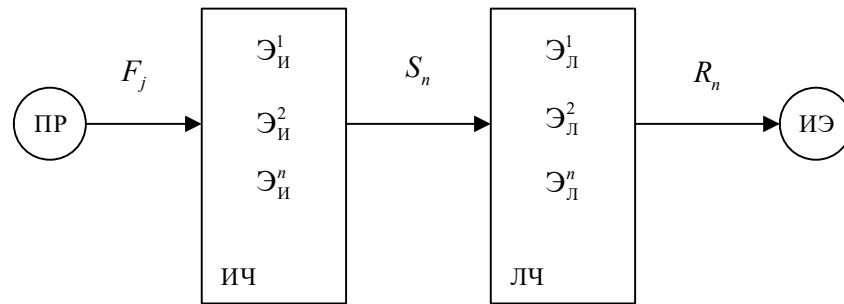


Рисунок 1 – Элементный состав устройства релейной защиты

Каждый элемент измерения срабатывает при наличии аварийного режима в своей защищаемой зоне. На рисунке 1 обозначено:

ПР – преобразователи;

ИЧ – измерительная часть устройств релейной защиты (УРЗов);

ЛЧ – логическая часть УРЗов;

ИЭ – исполнительный элемент.

$F_j \{f_{j1} \cdot f_{j2} \cdots f_{jn}\}$  – множество входных параметров элементов измерения, где  $j$  – номер параметра, соответствующего режиму работы тяговой сети;  $n$  – номер элемента измерения.

В результате анализа рассматриваемых УРЗов как объекта контроля сформированы функции, описывающие поведение элементов измерения и устанавливающие зависимость  $S_n$  от места повреждения [7 – 9].

При отсутствии неверных действий всех элементов измерения множество  $S_n$  однозначно определяется множеством  $F_j$ , уставкой срабатывания элемента измерения  $U_n$  и временной задержкой  $V_n$ :

$$S_n = \phi (F_j, U_n, V_n). \quad (1)$$

Нормами проектирования релейной защиты тяговой сети предписывается дистанционный принцип построения. Уставки срабатывания каждого элемента измерения определяются с учетом удаленности места аварии и обеспечения селективной работы. Исходя из изложенного можно утверждать, что зависимость между наличием короткого замыкания и его расположением на межподстанционной зоне и границами зон, защищаемых соответствующими элементами измерения (определяются уставками элементов измерения), позволяет определять правильность действий релейной защиты.

Рассматривая возможность выявления неверных действий защиты, необходимо иметь в виду, что в настоящее время не существует систем определения места повреждения, позволяющих идентифицировать координаты точки короткого замыкания с требуемой точностью, в связи с этим не представляется возможным анализировать поведение релейной защиты, ориентируясь на координаты точки короткого замыкания.

Предлагается, используя функциональную избыточность УРЗа, диагностировать ее, анализируя совокупности сработавших и не сработавших на конкретное короткое замыкание элементов измерения. С учетом того, что контроль действий защиты основан на логическом анализе соотношений границ зон действий элементов измерения, в дальнейшем рассматривается абстрактная защита. Ее элементы измерения имеют все возможные соотношения ближних и дальних границ защищаемых зон. Такой подход позволяет сформировать полную систему логических уравнений определения ложного срабатывания защиты, достоверную для любой реальной межподстанционной зоны.

На рисунке 2 представлено полное множество возможных соотношений границ защищаемых зон элементов измерения абстрактного устройства релейной защиты.

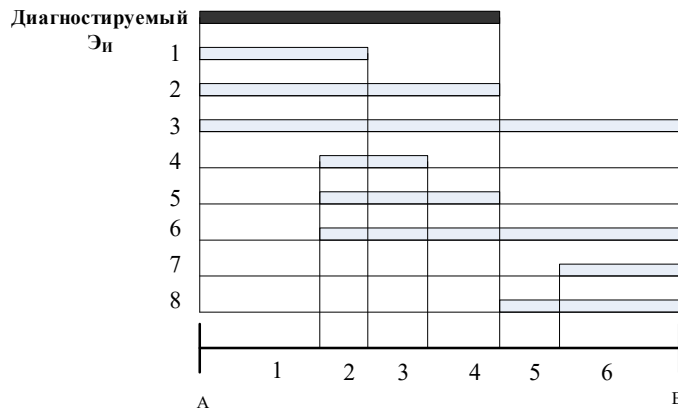


Рисунок 2 – Границы защищаемых зон элементов измерения УРЗов межподстанционной зоны А – В

С целью обеспечения возможности идентификации защищаемых зон введем обозначения их границ по отношению к границам зоны, защищаемой диагностируемым элементом измерения с учетом места его установки (подстанция А):

Д – контролируемый элемент измерения;

$\Gamma_{д.б}$  – ближняя граница защищаемой зоны диагностируемого элемента измерения;

$\Gamma_{д.д}$  – дальняя граница защищаемой зоны диагностируемого элемента измерения;

$\Gamma_б, \Gamma_д$  – соответственно ближняя и дальняя границы защищаемой зоны;

С(Д) – срабатывание диагностируемого элемента измерения;

С( $\Gamma_б, \Gamma_д$ ) – срабатывание элемента измерения с соответствующими границами защищаемой зоны;

Н( $\Gamma_б, \Gamma_д$ ) – несрабатывание элемента измерения с соответствующими границами защищаемой зоны;

Л – ложное срабатывание диагностируемого элемента измерения.

Очевидно, что имеет место восемь защищаемых зон с отличными границами, охватывающими все возможные соотношения с границами защищаемой зоны диагностируемого элемента измерения. Очевидно также, что на практике границы рассматриваемых зон не стабильны. Имеют место отклонения, обусловленные режимами работы энергосистем, условиями протекания тока короткого замыкания и пр. Необходимо иметь в виду, что величина этих отклонений ограничена условиями выполнения принципов устойчивости функционирования и селективности. Недопустимые отклонения – это один из факторов, провоцирующий неверные действия УРЗа.

На основании изложенного разработана модель выявления ложных срабатываний защиты:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б.д.б}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{б.д} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} = \Gamma_{д.д}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д < \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д = \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_{д.б} < \Gamma_б < \Gamma_{д.д}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}); \\
 Л = С(Д) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.б}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}) \wedge Н(\Gamma_б = \Gamma_{д.д}, \Gamma_д > \Gamma_{д.д}).
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Применительно к присоединению, питающему межподстанционную зону системы тягового электроснабжения, оборудованному стандартным составом релейных защит [10 – 12], полученная модель позволяет сделать заключение о возможности идентификации ложных срабатываний защит при коротком замыкании в любой точке.

Как уже отмечалось, для применения результатов выявления ложного срабатывания защиты в алгоритме автоматического повторного включения линии необходимо иметь возможность объективной оценки эффективности контроля.

Эффективность идентификации неверных действий релейной защиты в режиме реального времени определяется следующими факторами:

- сезонным числом коротких замыканий на рассматриваемой межподстанционной зоне;
- числом элементов измерения, входящих в состав релейной защиты;
- протяженностью зоны диагностирования (ЗД), т. е. той части межподстанционной зоны, авария на которой обеспечивает возможность контроля элемента измерения;
- временем нахождения релейной защиты в режиме дежурства.

В основе оценки эффективности контроля лежит зависимость

$$T_{in} \leq T_i^*, \quad (3)$$

где  $T_{in}$  – расчетный период проверок;

$T_i^*$  – интервал времени, определяемый допустимым уровнем надежности элемента измерения, при вероятности безотказной работы в аварийном режиме работы  $P_{it}^*$ .

На рисунке 3 представлена схема питания межподстанционной зоны с постом секционирования ПС, тяговыми подстанциями А, В.

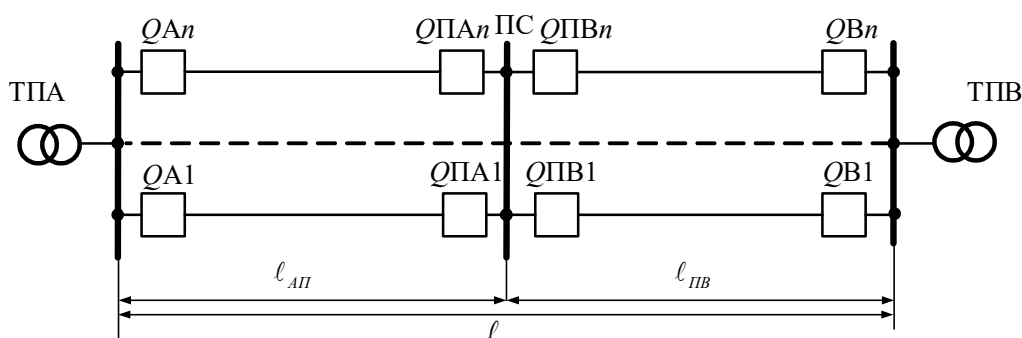


Рисунок 3 – Схема межподстанционной зоны

В соответствии со статьей [13] типы элементов измерения защит выключателей  $QA$ ,  $QPA$ ,  $QPB$ ,  $QB$  и соответственно соотношения границ защищаемых ими зон следующие.

Для выключателей  $QA$  и  $QB$ :

токовая отсечка (ТО) – до половины зоны «подстанция – пост секционирования»;

ненаправленная дистанционная защита – не более 0,9 зоны «подстанция – пост секционирования», но не менее защищаемой зоны ТО;

направленная дистанционная защита первой ступени (ДЗ1) – не более 0,8 зоны «подстанция – пост секционирования», но не менее защищаемой зоны ненаправленной дистанционной защиты;

направленная дистанционная защита второй ступени (ДЗ2) – не менее 1,2 зоны «подстанция – пост секционирования»;

направленная дистанционная защита третьей ступени (ДЗ3) – не менее 1,5 зоны «подстанция – пост секционирования».

Для выключателей  $QPA$ ,  $QPB$ :

токовая отсечка – не более половины зоны «пост секционирования – подстанция»;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

направленная дистанционная защита первой степени – не более 0,9 зоны «пост секционирования – подстанция», но не менее защищаемой зоны ТО;

направленная дистанционная защита второй степени – не менее 1,2 зоны «пост секционирования – подстанция»;

направленная дистанционная защита третьей степени – не менее 1,5 зоны «пост секционирования – подстанция».

Наиболее существенное влияние на эффективность контроля оказывает протяженность зоны диагностирования. Этот параметр определяется вариантом сбора данных о реакции защит межподстанционной зоны на короткое замыкание. В рассматриваемом случае диагностируемая защита установлена на присоединениях подстанции А. Исходя из этого возможны следующие варианты:

- 1 – сбор информации о работе защит подстанции А;
- 2 – сбор информации о работе подстанции А и поста секционирования;
- 3 – сбор информации о работе защит подстанций А и В;
- 4 – сбор информации о работе защит подстанций А, В и поста секционирования.

Зоны диагностирования ложного срабатывания измерительных элементов трехступенчатой защиты присоединения, питающего контактную сеть, представлены на рисунке 4. Как видно, для трех ступеней дистанционной защиты идентификация ложного срабатывания возможна при коротком замыкании в любой точке межподстанционной зоны. Зона диагностирования токовой отсечки составляет 75 % межподстанционной зоны.

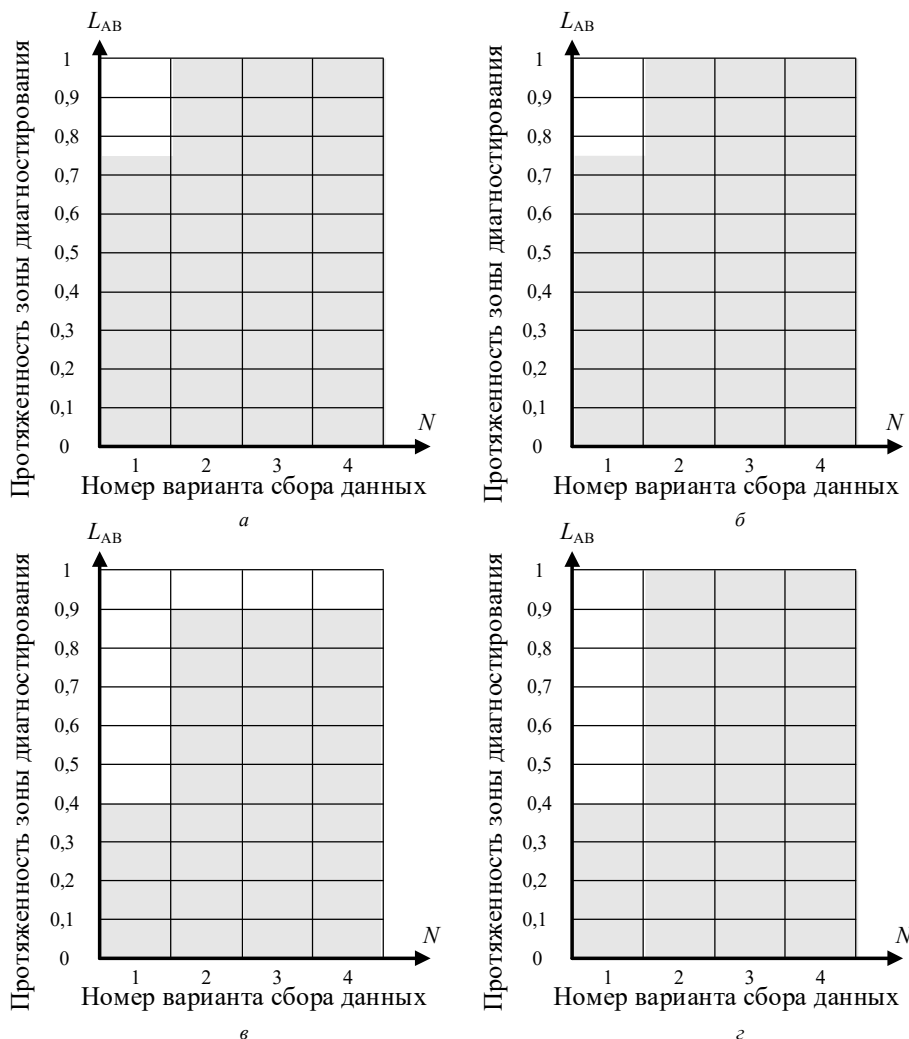


Рисунок 4 – Протяженность зон диагностирования трехступенчатой защиты:  
а – токовая отсечка; б – первая ступень; в – вторая ступень; г – третья ступень

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 5 представлены зависимости вероятности того, что интервал времени между двумя последовательными проверками защиты будет меньше  $T_i^*$  от числа коротких замыканий для вероятности безотказной работы защиты в режиме поступления требования на срабатывание, равной 0,99.

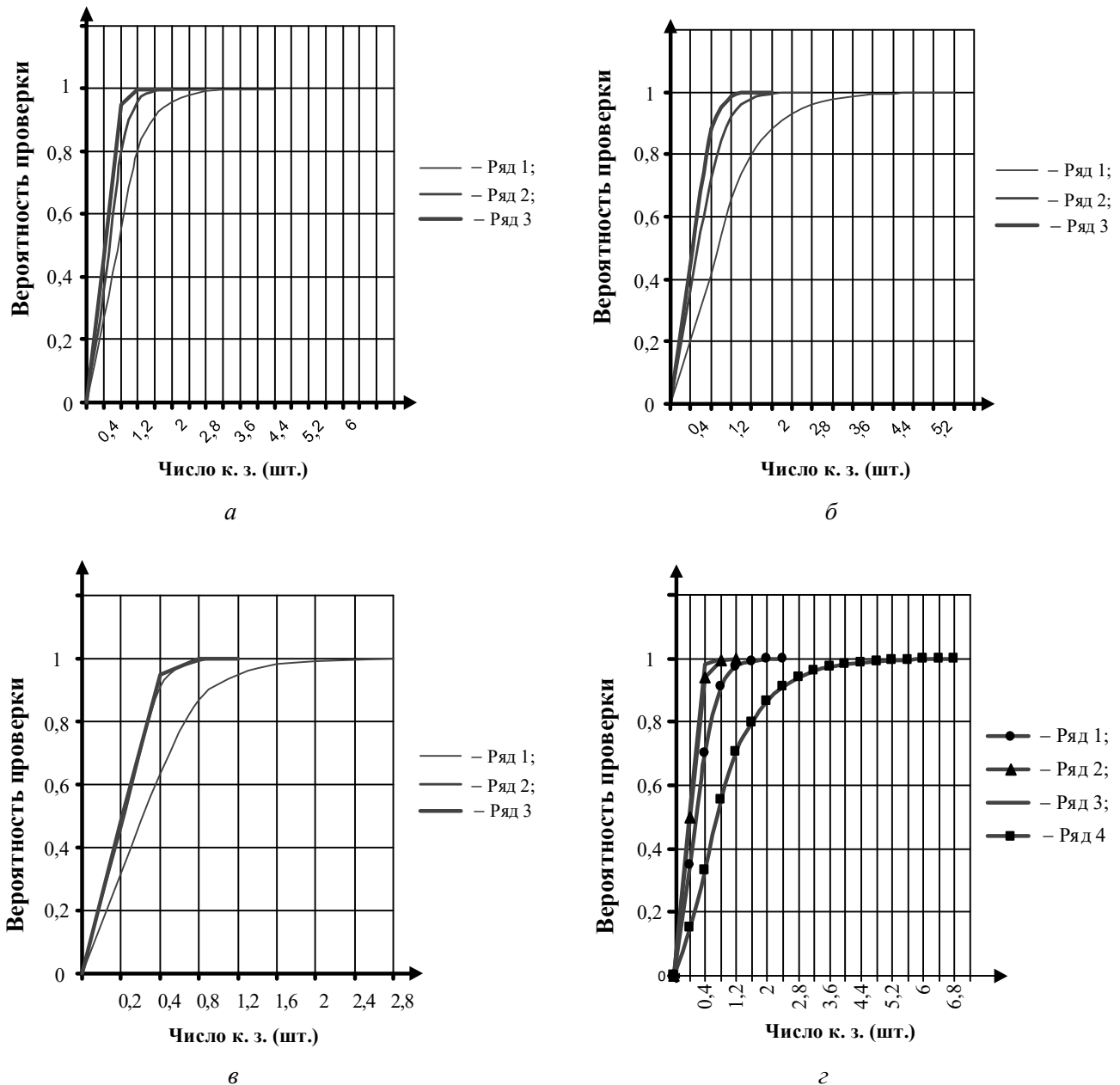


Рисунок 5 – Зависимость вероятности проверки трехступенчатой защиты от числа коротких замыканий:

Ряд 1 – ДЗ1; Ряд 2 – ДЗ 2; Ряд 3 – ДЗ 3; Ряд 4 – ТО;

а – г – первый – четвертый варианты сбора данных

Представленные зависимости позволяют сделать заключение о достаточно высокой эффективности рассматриваемого метода диагностирования релейной защиты в режиме реального времени. При этом, как показывают расчеты, вероятность обнаружения ложного срабатывания приближается к единице.

Это позволяет предполагать возможность использования результатов диагностирования защит в режиме реального времени как основы для совершенствования алгоритма

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

автоматического повторного включения в направлении минимизации задержки по времени.

На рисунке 6 представлена обобщенная блок-схема алгоритма быстродействующего автоматического повторного включения. Представленный алгоритм предусматривает реализацию известных алгоритмов автоматического повторного включения [14, 15].

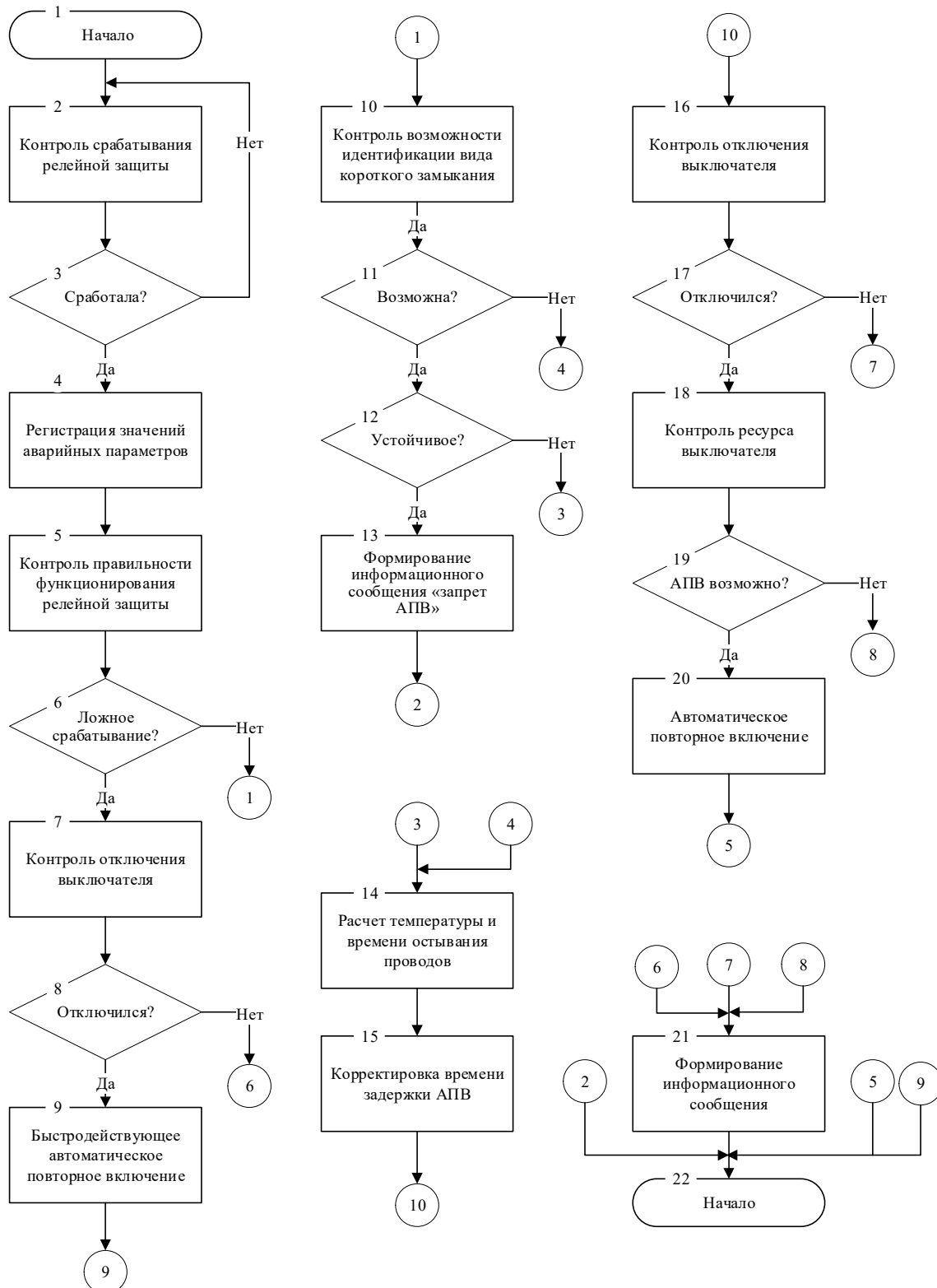


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма автоматического повторного включения

Отличие предлагаемого алгоритма заключается в осуществлении быстродействующего

автоматического повторного включения в случае идентификации ложного срабатывания релейной защиты (блоки 2 – 6).

Предложенный алгоритм АПВ предусматривает использование результатов диагностирования устройств релейной защиты в режиме реального времени. Вероятность идентификации ложных срабатываний элементов измерения при коротком замыкании в любой точке межподстанционной зоны близка к единице. Это позволяет применять результаты контроля действий релейной защиты в алгоритме автоматического повторного включения с целью минимизации времени восстановления электроснабжения потребителей.

### Список литературы

1. Zubkov V., Ryazanova E., Chebotareva E., Bakalov M., Gordienko A. Capacity and Traffic Management on a Heavy-Traffic Railway Line, *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*, 2020, pp. 934–949.

2. Типикина, А. П. Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит / А. П. Типикина, Л. С. Певцова. – DOI: 10.15862/74TVN215. – Текст : электронный // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – № 2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf> (дата обращения: 07.05.2024).

3. Анализ надежности электроснабжения транспортных систем в зависимости от состояния устройств релейной защиты и автоматики / А. А. Лундалин, Е. Ю. Пузина, И. А. Худоногов, В. В. Кашковский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 127–135.

4. Фигурнов, Е. П. Определение длительно допустимых токов проводов систем электроснабжения железных дорог / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, В. И. Харчевников. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2019. – Т. 78. – № 2. – С. 90–95.

5. Фигурнов, Е. П. К выбору вида схемы замещения тяговой подстанции при расчете токов короткого замыкания в системе электроснабжения 25 кВ / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Н. А. Попова. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2020. – Т. 79. – № 3. – С. 139–144.

6. He S., Shen L., Lui J. Analyzing Protective Relay Misoperation Data and Enhancing Its Correct Operation Rate, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, China, Asia and Pacific Dalian*, 2005.

7. Лысенко, В. Г. Автоматический контроль правильности функционирования релейной защиты тяговой сети / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина, М. В. Кирпинская. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3 (51). – С. 142–146.

8. Комплексное решение прикладных технологических задач автоматизации тягового электроснабжения / Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина, В. Г. Лысенко, Н. А. Попова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 130–139.

9. Доманский, В. В. Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский, Г. А. Доманская, В. А. Васенко. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (79). – С. 154–165.

10. Фигурнов, Е. П. Уточненная методика вычисления длительно допустимых токов изолированных проводов воздушных линий электропередачи и контактных сетей / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, В. И. Харчевников. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2021. – № 2. – С. 36–43.

11. Golub G.M. Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8-13.

12. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on Heating Uninsulated Wires of Overhead Transmission Lines. *Power Technology and Engineering*, 2017, vol. 51, issue 1, pp. 119-124.

13. Лысенко, В. Г. Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина, Н. А. Попова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (77). – С. 145–152.

14. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях / Л. А. Герман, А. Ю. Попов, А. В. Саморуков [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2017. – Т. 76. – № 5. – С. 266–272.

15. Герман, Л. А. Рациональная реконструкция постов секционирования контактной сети переменного тока на разъединителях / Л. А. Герман, Е. А. Донской, С. А. Капустин. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80. – № 5. – С. 269–275.

### References

1. Zubkov V., Ryazanova E., Chebotareva E., Bakalov M., Gordienko A. Capacity and Traffic Management on a Heavy-Traffic Railway Line, *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*, 2020, pp. 934–949.

2. Tipikina A.P., Pevtsova L.S. Evaluation of software reliability of microprocessor relay protections, DOI: 10.15862/74TVN215. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Internet journal «Science Studies»*, 2015, no. 2. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf> (accessed 07.05.2024).

3. Lundalin A.A., Puzina E.Yu., Khudonogov I.A., Kashkovskiy V.V. The analysis of reliability of power supply of transport systems, depending on the condition of devices of relay protection and automation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2019, no. 3 (63), pp. 127-135 (In Russian).

4. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Kharchevnikov V.I. Determination of long-term permissible currents in wires of power supply systems of railways. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 90-95 (In Russian).

5. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Popova N.A. Choosing the type of equivalent circuit of traction substation when calculating short-circuit currents in 25 kV power supply system. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 3, pp. 139-144 (In Russian).

6. He S., Shen L., Lui J. Analyzing Protective Relay Misoperation Data and Enhancing Its Correct Operation Rate, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, China, Asia and Pacific Dalian*, 2005.

7. Lysenko V.G., Kubkina O.V., Kirpinskaya M.V. Automatic control of correct functioning of power train relay protection equipment. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2013, no. 3 (51), pp. 142-146 (In Russian).

8. Zharkov Y.I., Kubkina O.V., Lisenko V.G., Popova N.A. Complex solution of the applied technological problems of traction power supply automation. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2021, no. 1 (81), pp. 130-139 (In Russian).

9. Domansky V.V., Domanskaya G.A., Vasenko V.A. Information technologies of operation modes of traction power energy and supplying their energy systems. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2020, no. 3 (79), pp. 154-165 (In Russian).

10. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Kharchevnikov V.I. Modified methodology of computation of admissible continuous currents of plain conductors of overhead transmission lines and catenaries. *Elektrichestvo – Electricity*, 2021, no. 2, pp. 36-43 (In Russian).

11. Golub G.M. Reliability control of failure-free operation of power supply system of railroad and its components by methods of intellectualization and informatization. *Metallurgical and mining industry*, 2017, no. 5, pp. 8-13.

12. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on Heating Uninsulated Wires of Overhead Transmission Lines. *Power Technology and Engineering*, 2017, vol. 51, issue 1, pp. 119-124.

13. Lisenko V.G., Kubkina O.V., Popova N.A. Determining boundaries of the power network section with a sustainable short close. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2020, no. 1 (77), pp. 145-152 (In Russian).

14. German L.A., Popov A.Yu., Samorukov A.V., Ishkin D.V., Yakunin D.V., Subkhanverdiev K.S. A new algorithm for automating power supply of an AC traction network with a sectioning points on switches. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2017, vol. 76, no. 5, pp. 266-272 (In Russian).

15. German L.A., Donskoy E.A., Kapustin S.A. Rational reconstruction of sectioning posts of AC catenary at disconnectors. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2021, vol. 80, no. 5, pp. 269-275 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Кубкина Ольга Владимировна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения», РГУПС.

Тел.: +7 (919) 889-20-04.

E-mail: kybkina@yandex.ru

### Осипова Анна Ивановна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения», РГУПС.

Тел.: +7 (903) 463-66-52.

E-mail: nyshka79@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кубкина, О. В. Минимизация времени автоматического повторного включения / О. В. Кубкина, А. И. Осипова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 61 – 71.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kubkina Olga Vladimirovna

Rostov State Transport University (RSTU).

Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automated power supply systems», RSTU.

Phone: +7 (919) 889-20-04.

E-mail: kybkina@yandex.ru

### Osipova Anna Ivanovna

Rostov State Transport University (RSTU).

Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don, 344038, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, senior lecturer of the department «Automated power supply systems», RSTU.

Phone: +7 (903) 463-66-52.

E-mail: nyshka79@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kubkina O.V., Osipova A.I. Minimizing time automatic reclosing. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 61-71 (In Russian).

**Р. Ю. Упырь, А. В. Дудакова**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕРВИСА БЫСТРОГО РЕАГИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ТЕРМИНАЛЬНО-СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**Аннотация.** *Сервис быстрого реагирования – современный тренд во многих областях деятельности, в том числе и на железнодорожном транспорте. С помощью выездных мобильных бригад проводят техническое обслуживание вагонов, их коммерческий осмотр, погрузочно-разгрузочные операции, оформление документов и др. В статье на примере Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом рассматривается опыт использования мобильных бригад для выполнения погрузки/выгрузки на грузовых дворах с небольшим объемом грузовых операций. Для определения эффективности работы бригад и, соответственно, целесообразности использования данного способа обслуживания станций, где отсутствуют собственные погрузочно-разгрузочные ресурсы, используется метод имитационного моделирования. В программной среде AnyLogic разработана модель работы сервиса быстрого реагирования, приведены основные диаграммы перехода состояний основных классов, определены показатели, такие как процент выполнения заявок, число грузовых операций, коэффициент загрузки бригады, средняя продолжительность грузовых операций. Также рассчитаны экономические показатели: доходы от деятельности выездных мобильных бригад (за выезд, за погрузочно-разгрузочные операции), детально рассмотрены и посчитаны эксплуатационные расходы (расходы за выезд техники и мобильной бригады в зависимости от километража, расходы за время выполнения грузовой работы). На основании полученных расчетов определен финансовый результат от деятельности и ее экономическая эффективность. Проведен ряд экспериментов с изменением определенных параметров, например, сокращение времени на грузовую операцию. Итак, благодаря разработанной динамической модели можно не только визуализировать процесс работы каждого из элементов системы, но и при помощи полученной статистики различных параметров понять, как работают мобильные бригады и грузовые дворы, где требуются корректировки. Кроме того, данная модель позволяет определить доходы и расходы от деятельности, выявить финансовый результат и рассчитать экономическую эффективность. Путем калибровки базовых параметров через проведение последующих симуляций можно определить пути повышения качества работы сервиса и увеличения прибыли.*

*Результаты получены в рамках НИОКТР «Цифровые модели транспортных технологических процессов» (Рег.номер 123122900011-4 от 29.12.2023г).*

**Ключевые слова:** *сервис быстрого реагирования, грузовой двор, погрузочно-разгрузочные работы, имитационное моделирование, AnyLogic, экономическая эффективность.*

**Roman Yu. Upyr, Anastasiya V. Dudakova**

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

## **SIMULATION OF THE OPERATION OF FAST RESPONSE SERVICE FOR PROVIDING THE WORK OF TERMINAL AND WAREHOUSE COMPLEXES**

**Abstract.** *The rapid response service is a modern trend in many areas of activity, including rail transport. Using mobile teams, technical maintenance of wagons, commercial inspection, loading and unloading operations, document preparation, and more are carried out. This article examines the experience of using mobile teams for loading/unloading at cargo yards with a small volume of cargo operations, taking the example of the Eastern Siberian Directorate for Managing Terminal and Warehouse Complexes. To assess the effectiveness of team work and, accordingly, the appropriateness of using this method of servicing stations lacking their own loading and unloading resources, simulation modeling is used. In the AnyLogic software environment, a model of the rapid response service operation has been developed, showing the main state transition diagrams of key classes, defining indicators such as the percentage of request fulfillment, the number of cargo operations, the crew load coefficient, and the average duration of cargo operations. Economic indicators have also been calculated: revenues from the activities of mobile teams (for departure, for loading and unloading operations), operational expenses (expenses for equipment and mobile team departure depending on mileage, expenses for performing cargo work time) were thoroughly examined and calculated. Based on these calculations, the financial result and economic efficiency of the activity were determined. Further experiments were conducted with changes in certain parameters, for example, reducing the time for loading operations. Thus, thanks to the developed dynamic model, not only can the process of working of each element of the system be visualized, but also through the obtained statistics of various parameters, understand how mobile teams and cargo yards operate and where*

*adjustments are needed. Furthermore, this model allows determining revenues and expenses from the activity, identifying the financial result, and calculating economic efficiency. By calibrating basic parameters through subsequent simulations, we can determine ways to improve the quality of service work and increase profits.*

*The results were obtained within the framework of R&D “Digital models of transport technological processes” (Reg. number 12312290011-4 dated December 29, 2023).*

**Keywords:** fast response service, cargo yard, loading and unloading operations, simulation modeling, AnyLogic, economic efficiency.

В настоящее время на железнодорожном транспорте получила распространение новая форма обслуживания – сервис быстрого реагирования – выезд мобильных бригад для выполнения определенных работ на территории клиента. Это могут быть работы по техническому обслуживанию подвижного состава [1]. Например, таким способом ОАО «Первая грузовая компания» оперативно устраняет неисправности вагонов. Об использовании мобильных бригад для коммерческого осмотра вагонов, оформления документов на станциях с небольшим объемом работ говорится в работе [2], а Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» [3] запустила сервис быстрого реагирования для грузоотправителей на небольших станциях, где нет специализированной техники и персонала для выполнения погрузочно-разгрузочных работ. Свердловская (СвЖД), Приволжская [4], Красноярская и другие железные дороги [3] уже в течение нескольких лет успешно применяет данный сервис.

Передвижные механизированные бригады имеются и в Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом. На сайте Дирекции в разделе Прейскуранты представлены тарифные ставки за выполнение ряда услуг, связанных с выездом мобильных бригад и необходимой техники с грузового терминала базирования в городе Улан-Удэ для выполнения перегрузки тяжеловесного груза из железнодорожного вагона или на него с использованием автомобильного крана. Такой сервис возможен не только для станций Горхон, Заиграево, Лесовозный, Селенга, Мысовая, Шалуты, Гусиное озеро, но и для любого отдаленного пункта при положительном экономическом обосновании стоимости услуги.

Мобильные бригады выполняют работы согласно принятой технической и нормативной документации. Обычно в услугу по погрузке/выгрузке тяжеловесных грузов включают следующие операции:

снятие реквизита крепления грузов/крепление (без учета стоимости реквизитов крепления) груза на железнодорожном подвижном составе/автомобиле;

перемещение груза из автомобиля в вагон/контейнер или из вагона/контейнера в автотранспорт техническими средствами. Заготовка необходимого реквизита крепления, щита ограждения в вагоне/контейнере, стрейч-пленки, паллета предоставляется по договоренности с заказчиком и за его счет.

Мобильная бригада обычно состоит из трех человек: машиниста автокрана и двух механизаторов (рисунок 1). Услуга включает в себя не только выезд работников, но и спецтехники (автокраны для перевалки тяжеловесных грузов, фронтальные погрузчики, грейферные перегружатели).



Рисунок 1 – Мобильная бригада при выполнении погрузочно-разгрузочных работ [3]

Подобный опыт – «быстрый сервис» выездных бригад – может быть распространен на разные сферы деятельности с отличающимися условиями среды. Однако при организации бизнес-процессов важно понимание того, как система должна работать, какие «узкие» места могут возникнуть, какие потребуются производственные мощности и ресурсы, что будет, если изменится спрос, произойдет случайное событие, насколько устойчива система к рискам, а что приведет к улучшению работы системы.

Данные задачи поддаются решению с помощью динамического моделирования. Имитационные модели, или цифровые двойники [5], позволяют проследить за работой системы в динамике, учитывая специфическую логику и случайные события. Во время симуляции модели происходит выполнение набора логических правил во времени, далее по результатам эксперимента возможно принятие решения и необходимых действий, что в дальнейшем приведет к оптимизации работы системы.

Целью данной статьи является на примере работы мобильных бригад Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом определение эффективности обслуживания грузовых дворов железнодорожных станций мобильными бригадами с помощью построения динамической модели в программной среде AnyLogic, поддерживающей все три парадигмы имитационного моделирования: системную динамику, дискретно-событийное моделирование и агентный подход [6]. Данный программный продукт хорошо зарекомендовал себя в моделировании задач транспортной логистики [7 – 9].

В основе целесообразности работы любой производственно-технологической системы лежит ее экономическая эффективность. Задача поиска решения, при которой затраты всех участников процесса будут наименьшими, является важной и актуальной при планировании работ. Погрузка/выгрузка на железнодорожных станциях могут выполняться собственными силами и техникой, расположенными на грузовом дворе, или при помощи сервиса быстрого реагирования. Однако содержание избыточных собственных погрузочно-разгрузочных ресурсов на станциях с небольшим объемом работ может приводить к повышенным затратам, а нехватка погрузочно-разгрузочных мощностей – к длительным простоям подвижного состава под грузовыми операциями, что негативно сказывается на работе всего железнодорожного транспорта. Соответственно проблемы простоев в ожидании погрузки-выгрузки, сокращения этого времени, оптимизации штата механизированных бригад затрагивают большое число участников перевозочного процесса, прежде всего владельцев путей необщего пользования, грузовладельцев и, конечно, основного перевозчика и владельца инфраструктуры – ОАО «РЖД».

Работа мобильных бригад (МБ) заключается в следующем: в случае появления потребности погрузки/выгрузки на грузовых дворах небольших железнодорожных станций (Горхон, Заиграево, Лесовозный, Селенга, Мысовая, Шалуты, Гусиное озеро) МБ получает заказ на погрузочно-разгрузочные работы и выдвигается в указанный адрес, далее – выполняется комплекс услуг по погрузке/выгрузке, после окончания работ МБ возвращается на грузовой терминал приписки и берет следующий заказ. Для построения модели примем за «базу» исходные данные, представленные в таблице 1, позволяющие наглядно показать «потенциал» работы сервиса быстрого реагирования. В реальных же условиях значения показателей, к примеру, «время на грузовые операции», будет варьироваться в зависимости от вида груза в пределах от 2 часов на погрузку одного вагона и выше.

Себестоимость работ мобильной бригады на конкретном грузовом дворе определяется [8] исходя из стоимости материалов для стандартного крепления груза, перемещения груза из автомобиля в вагон или наоборот (погрузка/выгрузка), крепления груза на подвижном составе, передислокации МБ к месту погрузки и обратно, в зависимости от расстояния, определяется по выражению:

$$C_i = C_{\text{мат}} + C_{\text{п/р}} + C_{\text{кр}} + C_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{мат}}$  – стоимость материалов крепления;

# Управление процессами перевозок

$C_{п/р}$  – стоимость погрузочно-разгрузочных работ;

$C_{кр}$  – стоимость услуги закрепления или его снятия;

$C_{тр}$  – стоимость транспортировки МБ к месту выполнения работ и обратно.

Таблица 1 – Принятые параметры в моделируемой системе

Параметр	Значение
Скорость перемещения МБ	60 км/ч
Максимальное время непрерывной работы	12 ч
Отдых МБ	12 ч
Количество вагонов в заявке*	1–5
Время на грузовые операции*	1–2 ч/ваг.
Норма загрузки вагона**	30–68 т
Количество заявок от грузовых дворов***	1 в день
Стоимость 1 км пробега МБ	35 руб./км
Количество работников в одной МБ	3 чел
Часовая тарифная ставка одного работника	400 руб./ч
Часовая тарифная ставка работы автокрана	700 руб./ч
Стоимость перегрузки по видам груза [2]:	руб./т
– МКР	472
– ЖБИ	713
– металл	373
– лес круглый	458
– пиломатериалы	560
– прочее	367
Стоимость выезда бригады [2]:	руб.
– Горхон	54000
– Заиграево	40000
– Лесовозный	40000
– Селенга	55000
– Мысовая	70000
– Шалуты	64000
– Гусиное озеро	95000

\* задается при помощи дискретного равномерного распределения;

\*\* при генерации используется треугольное распределение;

\*\*\* заявка формируется после выполнения предшествующей заявки, с частотой 1 раз в день

Прибыль от работы МБ приведена в формуле (2) и может быть определена как разница между ценой заказа ( $\Pi_i$ ) и себестоимостью выполнения данной услуги ( $C_i$ ). Общий результат работы системы складывается из прибылей всех грузовых дворов (3):

$$P_i = \Pi_i - C_i; \quad (2)$$

$$P = \sum P_i. \quad (3)$$

Следовательно, экономическая эффективность (ЭЭ) обслуживания удаленных грузовых дворов с помощью мобильных бригад указана в формуле (4) и определяется как отношение сумм доходов от деятельности к сумме затрат (выражается в процентах), рассчитав которую можно сделать вывод о продуктивной или непродуктивной работе системы обслуживания грузовых дворов с помощью выездных бригад:

$$ЭЭ = \sum \Pi_i / C_i \cdot 100, \quad (4)$$

где  $\Pi_i$  – цена заказов грузового двора, определяемая суммированием цены за выполнение погрузочно-разгрузочных работ, оплаты за выезд МБ и (при необходимости, по желанию клиента) оплаты за материалы крепления груза, выполнение услуг по снятию или установке закрепления груза;

$C_i$  – себестоимость работ, определяемая из выражения (1).

Для построения имитационной модели работы мобильных бригад примем следующие обозначения и допущения. Объекты, поведение которых мы будем представлять и изучать в модели: грузовой двор (CargoYard), мобильная бригада (ServiceCrew). Создадим три экземпляра класса для мобильных бригад, базирующихся в пункте приписки (железнодорожная станция Улан-Удэ). Класс CargoYard содержит семь агентов, что равно количеству грузовых дворов отдаленных железнодорожных станций: Горхон, Заиграево, Лесовозный, Селенга, Мысовая, Шалуты, Гусиное озеро. Расположение данных агентов на ГИС-карте приведено на рисунке 2.

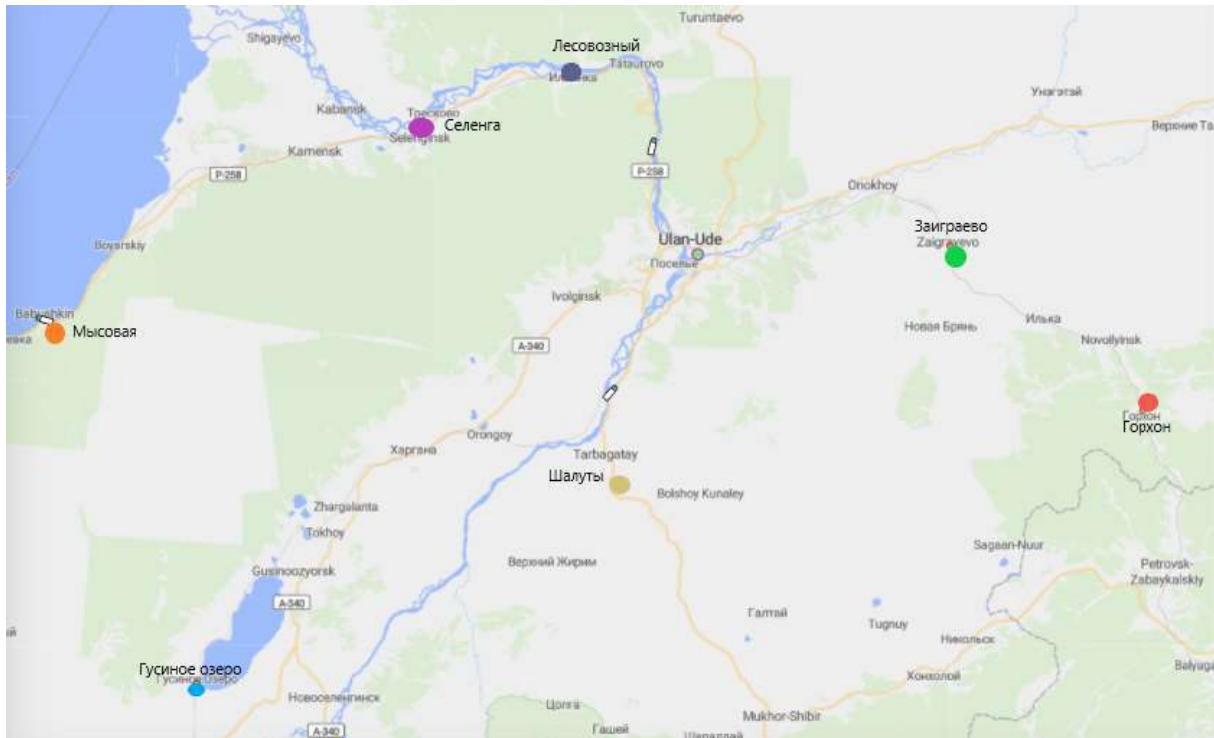


Рисунок 2 – Расположение грузовых дворов на карте (составлено авторами в среде AnyLogic)

Взаимодействие агентов в модели можно описать с помощью диаграмм состояний и переходов между ними (рисунки 3, 4).

Для описания поведения мобильных бригад – агентов ServiceCrew – зададим следующую логику: получение заказа, выезд к месту работы, выполнение работ, проверка «есть ли заказ», и далее едет работать, иначе возвращается в пункт базирования. В случае продолжительности непрерывной работы 12 часов и более мобильная бригада не берет следующий заказ на работу, а уходит на отдых.

Грузовой двор представим в виде класса CargoYard, в котором зададим процесс перехода из начального состояния отсутствия работы в состояние получения заявки, а по прибытии мобильной бригады запускается процесс выполнения работ, после завершения которого происходит возврат в состояние ожидания заявки.

Построенная имитационная модель позволяет визуализировать процесс обслуживания мобильными бригадами отдаленных грузовых дворов Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом. При помощи собранной статистики, приведенной на рисунках 5 – 7, в результате экспериментов появляется возможность анализа работы системы и поиска «узких» мест. Кроме того, при варьировании базовых параметров, таких как «время на погрузку одного вагона», «количество вагонов» в заявке, «количество мобильных бригад» и др., появляется возможность модифицировать работу системы сервиса быстрого реагирования и отвечать на вопрос, а что будет, если...

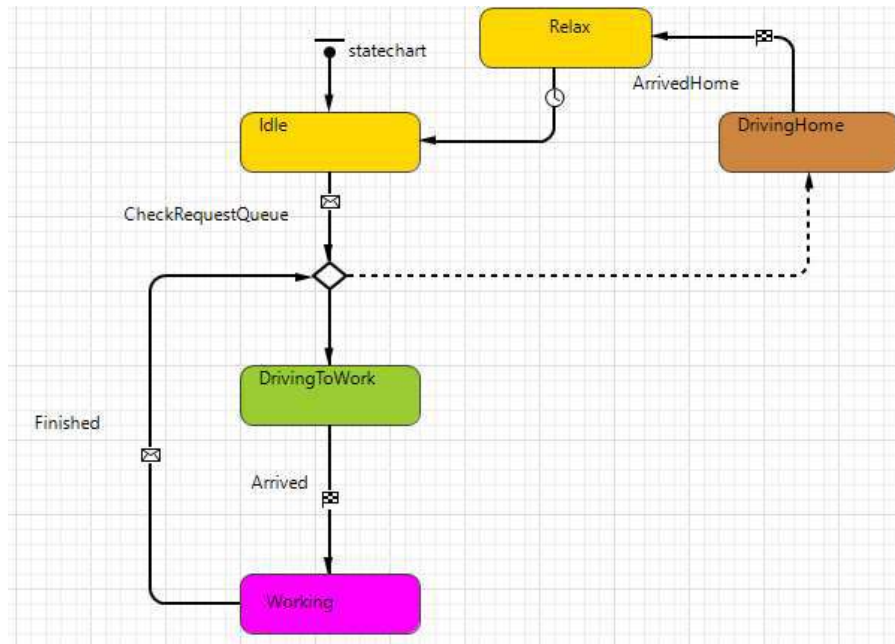


Рисунок 3 – Диаграмма перехода состояний для класса ServiceCrew (составлено авторами в среде AnyLogic)

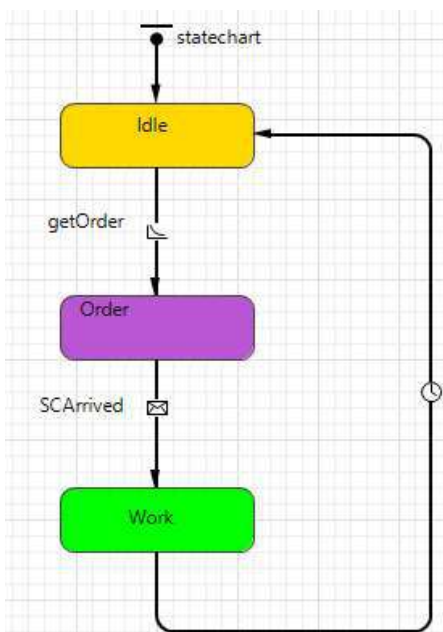


Рисунок 4 – Диаграмма перехода состояний для класса CargoYard (составлено авторами в среде AnyLogic)

Большое значение в бизнес-планировании имеет этап оценки рисков, что также возможно при работе с моделью. Например, оценка поведения системы во времени при изменении спроса на услугу, т. е. количества заявок, изменения количества бригад, скорости их перемещения к месту выполнения работ, стоимости ГСМ, стоимости выполнения работ, надежности (невыход бригады на работу), влияния случайных событий.

В качестве примера на рисунках 5 – 7 представлены результаты одного эксперимента в результате моделирования работы мобильных бригад по исходным данным (см. таблицу 1) за период 30 дней. Показатели работы представлены в таблице 2. Из данных статистики видно, что не все заявки были выполнены, три бригады не справляются с заданным объемом заявок, присутствует переработка у третьей бригады, а первая и вторая загружены практически на 100 %. Ввиду того, что время работы и отдыха не соответствует положенному по условиям модели и в процентном соотношении равно, соответственно, 51 и 49 %, требуется увеличение количества мобильных бригад. При этом экономическая эффективность сервиса быстрого реагирования составила 404 %.

Проведем еще один эксперимент, сократив время на грузовую операцию с 1–2 часов на вагон до 1 часа на вагон. Результаты симуляции приведены в таблице 3. Работа мобильных бригад нормализовалась, коэффициент их загрузки – в пределах допустимого (0,7 – 0,9). Несмотря на меньшее количество переработанных вагонов экономическая эффективность выросла с 404 до 464 %, увеличился и процент выполнения заявок, практически он равен 100 %.

# Управление процессами перевозок

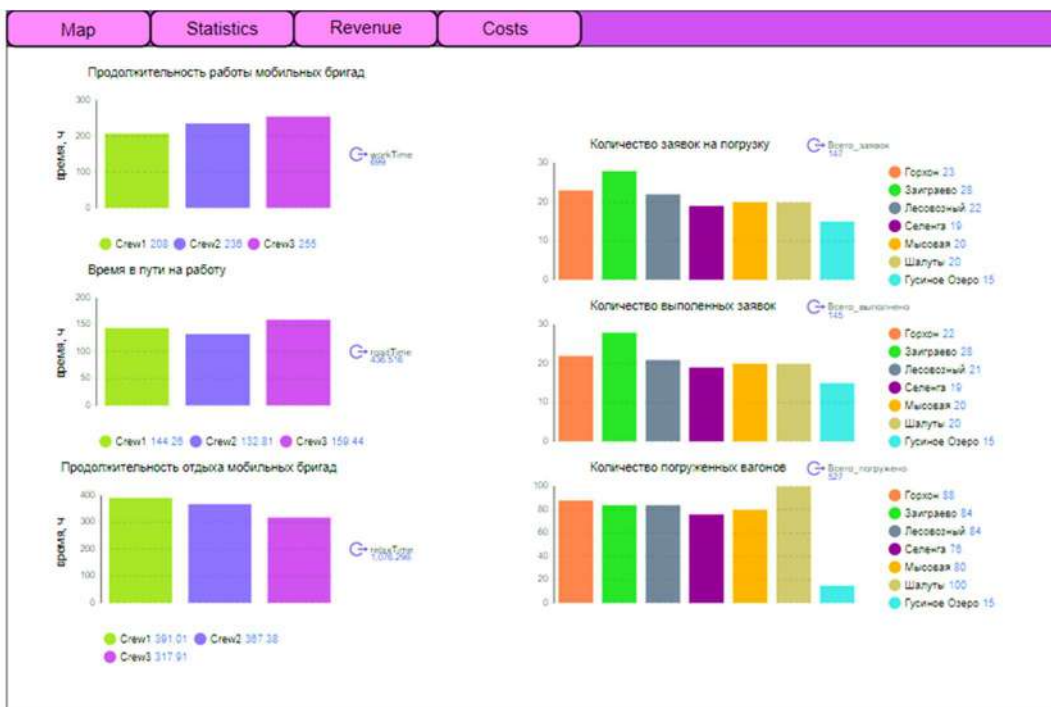


Рисунок 5 – Статистика по работе мобильных бригад за период 30 дней (составлено авторами в среде AnyLogic)

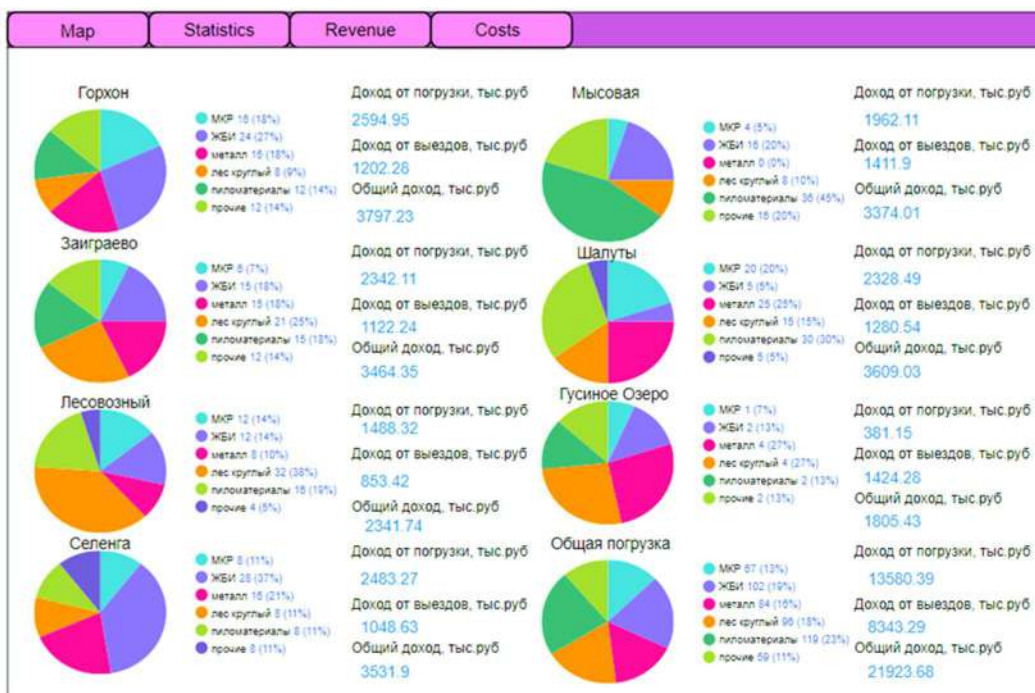


Рисунок 6 – Статистика по работе грузовых дворов за период 30 дней (составлено авторами в среде AnyLogic)



Рисунок 7 – Экономические показатели за 30 дней (составлено авторами в среде AnyLogic)

# Управление процессами перевозок

Таблица 2 – Показатели работы сервиса быстрого реагирования за 30 дней. Эксперимент №1

Показатель	Значение
Всего заявок	147
Среднее количество заявок одного грузового двора	21
Процент выполнения заявок	98,6
Общее число переработанных вагонов	527
Средний простой под одной грузовой операцией, ч	1,3
Коэффициент загрузки мобильной бригады:	
– бригада 1	0,94
– бригада 2	0,99
– бригада 3	1,11
Среднее время в пути одной МБ, ч	146 (19 %)
Среднее время выполнения работ одной МБ, ч	233 (32 %)
Средняя продолжит. отдыха одной МБ, ч	359 (49 %)
Доходы всего, тыс. руб.	21 920
Расходы всего, тыс. руб.	5 424
Прибыль, тыс. руб.	16 500
Экономическая эффективность, %	404

Таблица 3 – Показатели работы сервиса быстрого реагирования за 30 дней. Эксперимент №2

Показатель	Значение
Всего заявок	150
Среднее количество заявок одного грузового двора	21,4
Процент выполнения заявок	99
Общее число переработанных вагонов	442
Средний простой под одной грузовой операцией, ч	1
Коэффициент загрузки мобильной бригады:	
– бригада 1	0,74
– бригада 2	0,70
– бригада 3	0,96
Среднее время в пути одной МБ, ч	150 (20 %)
Среднее время выполнения работ одной МБ, ч	147 (40 %)
Средняя продолжит. отдыха одной МБ, ч	444 (60 %)
Доходы всего, тыс. руб.	20 690
Расходы всего, тыс. руб.	4 418
Прибыль, тыс. руб.	16 280
Экономическая эффективность, %	468

Сервис быстрого реагирования широко применяется в различных областях деятельности, в том числе на железнодорожном транспорте, и позволяет гибко реагировать на потребности клиентов. Данный сервис привлекателен тем, что при качественном оказании услуг приводит к повышению спроса со стороны грузоотправителей, следовательно, к повышению доходов с одновременным сокращением расходов на содержание собственных ресурсов. Работа мобильных бригад позволяет обеспечить клиентов тем же сервисом и уровнем услуг, что и на крупных транспортно-логистических терминалах.

Появление современных информационных технологий, автоматизация и анализ данных позволяют сокращать время на принятие решений, использовать прогнозирование путем моделирования бизнес-процессов, создания динамических моделей, позволяющих множественными экспериментами выявлять «узкие» места в работе систем. В данной статье с использованием AnyLogic была реализована модель сервиса быстрого реагирования [10] на примере работы Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом, позволяющая произвести следующее:

проверить и наглядно отобразить процесс работы каждого из элементов системы;  
при помощи полученной статистики различных параметров понять, как работают мобильные бригады и грузовые дворы, где требуются корректировки;  
определить доходы и расходы от деятельности, выявить финансовый результат и рассчитать экономическую эффективность;  
путем калибровки базовых параметров провести ряд экспериментов для определения путей повышения качества работы сервиса и увеличения прибыли;  
выявить, какие риски существуют в работе, как повлияет возникновение случайных событий на деятельность мобильных бригад и грузовых дворов и общий результат системы.  
Результаты получены в рамках НИОКТР «Цифровые модели транспортных технологических процессов» (Рег.номер 123122900011-4 от 29.12.2023г).

### Список литературы

1. Мобильные бригады ПГК приступили к оперативному ремонту вагонов в Сибири // [logistics.ru](https://logistics.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://logistics.ru/transportirovka/mobilnye-brigady-pgk-pristupili-k-operativnomu-remontu-vagonov-v-sibiri> (дата обращения: 02.06.2024).
2. Вакуленко, С. П. Применение мобильных бригад для обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 1. – С. 44–51.
3. Сервис быстрого реагирования // [cargo.rzd.ru](https://cargo.rzd.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/10460/page/103290?id=18971#main-header> (дата обращения: 02.06.2024).
4. Количество выездных мобильных бригад на ПривЖД увеличилось на треть в 2023 году // [volgograd.kp.ru](https://volgograd.kp.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.volgograd.kp.ru/online/news/5672660/> (дата обращения: 02.06.2024).
5. Гончарова, Н. Ю. Использование методов имитационного моделирования в железнодорожном транспорте / Н. Ю. Гончарова, Р. Ю. Упырь, А. В. Дудакова. – Текст : непосредственный // Мировые научные парадигмы в цифровую эпоху: взгляд в будущее : материалы международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 30 октября 2022 г. – Ростов-на-Дону : Манускрипт, 2022. – Ч. 2 – С. 72–75.
6. Официальный сайт AnyLogic // [anylogic.ru](https://www.anylogic.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 10.06.2024).
7. Король, Р. Г. Транспортно-логистическая архитектура мультимодальных перевозок Амурского бассейна / Р. Г. Король, О. Н. Числов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 145–155.
8. Anylogic. Истории успеха // [anylogic.ru](https://www.anylogic.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.anylogic.ru/resources/case-studies/> (дата обращения: 20.05.2024).
9. Пальмов, С. В. Моделирование деятельности логистической компании средствами Anylogic и anyLogistix / С. В. Пальмов, В. А. Куку. – Текст : непосредственный // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 2 (104). – С. 92–99.
10. Upry R., Dudakova A. Mobile work crews for Freight Yard: модель. – URL: <https://cloud.anylogic.com/model/085226ee-3bc3-4425-a9335cb2826defbc?mode=SETTINGS&tab=GENERAL> (дата обращения: 20.06.2024).

### References

1. *Mobil'nyye brigady PGK pristupili k operativnomu remontu vagonov v Sibiri* [Freight One's mobile teams have begun prompt repairs of railcars in Siberia]. Available at: <https://logistics.ru/transportirovka/mobilnye-brigady-pgk-pristupili-k-operativnomu-remontu-vagonov-v-sibiri> (accessed 02.06.2024).
2. Vakulenko S.P., Colin A.V., Evreenova N.Yu. Use of mobile teams for maintenance of low-intensity railwaylines. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2020, no. 1, pp. 44-51 (In Russian).

3. *Servis bystrogo reagirovaniya* [Fast response service]. Available at: <https://logistics.ru/transportirovka/mobilnye-brigady-pgk-pristupili-k-operativnomu-remontu-vagonov-v-sibiri> (accessed 02.06.2024).

4. *Kolichestvo vyyezdnykh mobil'nykh brigad na PrivZHD uvelichilos' na tret' v 2023 godu* [The number of mobile teams on PrivZhD increased by a third in 2023]. Available at: <https://www.volgograd.kp.ru/online/news/5672660/> (accessed 02.06.2024).

5. Goncharova N.Yu., Upyr R.Yu., Dudakova A.V. [The use of simulation modeling methods in railway transport]. *Mirovyye nauchnyye paradigmy v tsifrovuyu epokhu: vzglyad v budushcheye : materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World scientific paradigms in the digital era: a look into the future: materials of the VIII International scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2022, vol. 2, pp. 72-75 (In Russian).

6. *Ofitsial'nyy sayt AnyLogic* [AnyLogic official website]. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (accessed 10.06.2024).

7. Korol R.G., Chislov O.N. Transport and logistics architecture of multimodal transportation of the Amur basin. *Izvestia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 145-155 (In Russian).

8. *Anylogic. Istorii uspekha* [Anylogic. Success stories]. Available at: <https://www.anylogic.ru/resources/case-studies/> (accessed 20.05.2024).

9. Palmov S.V., Kuku V.A. Logistic company simulation by AnyLogic and anyLogistix. *Nauka i biznes: puti razvitiia – Science and Business: Ways of Development*, 2020, no. 2 (104), pp. 92-99 (In Russian).

10. Upyr R., Dudakova A. Mobile work crews for Freight Yard: model. Available at: <https://cloud.anylogic.com/model/085226ee-3bc3-4425-a9335cb2826defbc?mode=SETTINGS&tab=GENERAL> (accessed 20.06.2024).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Упырь Роман Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 914 899-96-26.

E-mail: [upyr\\_ru@irgups.ru](mailto:upyr_ru@irgups.ru)

### Дудакова Анастасия Владимировна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 908 660-87-88.

E-mail: [dunas1@yandex.ru](mailto:dunas1@yandex.ru)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Упырь, Р. Ю. Моделирование работы сервиса быстрого реагирования для обеспечения работы терминально-складских комплексов / Р. Ю. Упырь, А. В. Дудакова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 72 – 81.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Upyr Roman Yur'evich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevskogo st., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Operational work management», ISTU.

Phone: +7 914 899-96-26.

E-mail: [upyr\\_ru@irgups.ru](mailto:upyr_ru@irgups.ru)

### Dudakova Anastasiya Vladimirovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevskogo st., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Operational work management», ISTU.

Phone: +7 908 660-87-88.

E-mail: [dunas1@yandex.ru](mailto:dunas1@yandex.ru)

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Upyr R.Yu., Dudakova A.V. Simulation of the operation of fast response service for providing the work of terminal and warehouse complexes. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 72-81 (In Russian).

**А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

## **СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛАСТА**

**Аннотация.** Проводится оценка динамического воздействия на путь при применении новой технологии равномерного распределения и уплотнения балласта, отличной от известных способов, применяемых в технологии текущего содержания пути, в том числе суфляжа. Рассматриваются недостатки известных способов выравнивания балласта под шпалами, традиционной подбивки балласта шпалоподбойками, суфляжа механического с помощью суфляжной лопаты и пневматического нагнетания мелких фракций балласта в полость между постелью шпалы под давлением. Анализируется возможность снижения воздействия на путь применением нового предложенного в 2023 г. способа равномерного распределения балласта под шпалу, основанного на известном физическом явлении возвратно-поступательного движения шпалы под воздействием подвижного состава. Под шпалу укладывают перфорированную оболочку с балластом с отверстиями от минимального размера фракции до максимального. Под нагрузкой колеса балласт выдавливается из отверстий, а при разгрузке перетекает в свободные места. Оболочка также может быть использована в качестве демпфера. Динамическое воздействие подвижного состава на шпалу, уложенную на оболочку, описывается уравнением вертикальных колебаний плоского элемента с трансверсально-изотропными механическими свойствами с постоянной толщиной вдоль и поперек железнодорожного пути соответственно.

Вертикальное перемещение точек срединной плоскости шпалы определяется геометрическими и механическими характеристиками участка, при этом рассматриваются плоские элементы: по типам Филиппова И. Г., Тимошенко С. П., Кирхгофа – Лява. Построен график изменения вертикальных перемещений точек срединной поверхности шпалы, уложенной на перфорированную оболочку на участке в 50 м при движении экипажа с нагрузкой на ось в 25 т. Применение нового способа позволяет снизить динамическое воздействие на путь, скорость развития дефектов рельсов и заменить дорогостоящую технологию укладки подбалластных матов.

**Ключевые слова:** балласт, железнодорожный путь, суфляж, оболочка, шпала, колесо, воздействие, динамика, демпфер.

**Anna V. Sycheva, Alexey A. Loktev, Vyacheslav P. Sychev**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russian Federation

## **REDUCING THE DYNAMIC IMPACT OF ROLLING STOCK ON THE RAILWAY TRACK BY USING NEW TECHNOLOGY FOR BALLAST DISTRIBUTION**

**Abstract.** An assessment is made of the dynamic impact on the track when using a new technology for uniform distribution and compaction of ballast, which is different from the known methods used in the technology of ongoing track maintenance, including soufflage. The disadvantages of the known methods of leveling ballast under sleepers, traditional tamping of ballast with sleeper tampers, mechanical soufflage using a soufflage shovel and pneumatic injection of small fractions of ballast into the cavity between the sleeper bed under pressure are considered. The possibility of reducing the impact on the track is analyzed by using a new method proposed in 2023 for uniform distribution of ballast under the sleeper, based on the well-known physical phenomenon of the reciprocating movement of the sleeper under the influence of rolling stock. A perforated shell with ballast with holes from the minimum fraction size to the maximum is placed under the sleeper. Under wheel load, ballast is squeezed out of the holes, and when unloaded, it flows into free spaces. The shell can also be used as a damper. The dynamic effect of the rolling stock on the sleeper laid on the shell is described by the equation of vertical vibrations of a flat element with transversally isotropic mechanical properties and constant thickness along and across the railway track, respectively.

The vertical movement of the points of the middle plane of the sleeper is determined by the geometric and mechanical characteristics of the section, while flat elements are considered: according to the types of Filippova I.G., Timoshenko S.P., Kirchhoff - Love. A graph has been constructed of changes in the vertical displacements of points on the middle surface of a sleeper laid on a perforated shell over a section of 50 m when the crew is moving with an axle load of 25 tons. The use of a new method makes it possible to reduce the dynamic impact on the track, the rate of development of rail defects and replace the expensive technology of laying sub-ballast mat.

**Keywords:** ballast, railway track, soufflage, shell, sleeper, wheel, impact, dynamics, damper.

Неравномерное распределение балласта под шпалой вызывает появление длинных неровностей пути, дефектов рельсов, просадок, перекосов, толчков подвижного состава, трещин и изломов шпал [1, 2]. Чаще всего неравномерное распределение балласта под постелью шпалы возникает в середине шпалы.

Наиболее распространенный способ уплотнения балласта – подбивка балласта под шпалу вручную средствами малой механизации или механизированным способом с помощью выправочно-подбивочных отделочных машин.

Менее применяемый способ равномерного распределения балласта под шпалой – так называемый суфляж (см., например, Технический железнодорожный словарь. – М.: Государственное транспортное издательство, 1941), заключающийся в подсыпке порций балласта под шпалы. В основном указанный способ делится на известный давно и почти не применяемый механический суфляж с помощью так называемой суфляжной лопаты, на которую укладываются порция балласта, и на пневматический суфляж, заключающийся в том, что под шпалу вдувают заданную порцию балласта [3]. Недостатками механического суфляжа с помощью суфляжной лопаты являются высокая трудоемкость работ, преимущественно связанная с объемом подготовительных работ, а именно с освобождением от балласта торцов шпал, а также повышенная опасность использования лопаты, вызванная большими размерами лопаты, особенно со стороны междупутья, причем при интенсивном движении использование лопаты практически невозможно и, кроме того, ее применение требует определенных навыков и квалификации путевого рабочего.

Технология пневматического суфляжа разработана в семидесятых годах прошлого века британскими специалистами взамен известного способа выправки пути подбивкой балласта. Суть способа заключается в нагнетании мелкого щебня в полость между нижней поверхностью шпалы и постелью шпалы с помощью давления сжатого воздуха.

Однако и пневматический суфляж не менее трудоемок чем механический, так как требуются те же, что и при механическом суфляже, подготовительные работы, а именно отрывка балласта по концам шпал и в шпальных ящиках. При этом для пневматического суфляжа необходимо использовать воздуходувное устройство, связанное с компрессором, которое не всегда легко доставить на эксплуатируемый участок пути и эксплуатировать в перерывах между поездами или в специально выделенные технологические перерывы. В восьмидесятых годах прошлого века для железных дорог Великобритании фирмой Harsco Track Technologies была изготовлена машина для пневмосуфляжа на базе машины Plasser 06-16 STM.

Широкого распространения машины для пневмосуфляжа не получили [4].

В 2023 г. предложен и запатентован новый простой способ выравнивания рельсовой нити распределением балласта под шпалу [5]. Суть способа заключается в использовании возвратно-поступательного движения шпалы под воздействием подвижного состава, позволяющего из укладываемой под шпалу оболочки выдавить через отверстия в оболочке балласт, предварительно уложенный в оболочку. Оболочка из износостойкого материала с множеством отверстий по размеру должна быть не меньше, чем размер фракции балласта, при этом оболочка может быть выполнена из металлической сетки. Балласт в оболочку может загружаться той же фракции, что укладывается в путь по ГОСТ 7392–2014, в частности, с размером зерен от 30 до 60 мм, однако для более равномерного распределения эффективнее использовать щебень более мелкой фракции, например, 10 – 30 мм.

Объем балласта, потребного для выравнивания рельсовой нити, оценивается по результатам измерений отклонений рельсовой нити, причем для длинных неровностей допускается определять отклонения визуально, «на глаз». От шпалы отрывают балласт и приподнимают домкратами или иным подъемным устройством на высоту, позволяющую уложить одну или множество последовательно укладываемых оболочек и затем шпалу опускают на оболочку. Под действием поездной нагрузки шпала совершает возвратно-

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

поступательные движения, выдавливая из оболочки часть балласта, который заполняет свободные места под шпалой; часть балласта перетекает в свободную зону и уплотняется.

Числом и размерами отверстий в оболочке устанавливают скорость истечения балласта из оболочки. Материал для изготовления оболочки должен быть износостойким. Оболочка может быть выполнена из тканого, резинокордового или иного материала, в том числе, например, из металлической сетки [6].

На рисунке 1 приведена схема укладки перфорированных оболочек под несколько последовательно расположенных шпал, указаны позиции 1 – балласт; 2 – оболочка; 3 – шпала; 4 – рельс. Черные кружки обозначают примерное расположение точек контроля суммарных перемещений для определения напряженно-деформированного состояния.

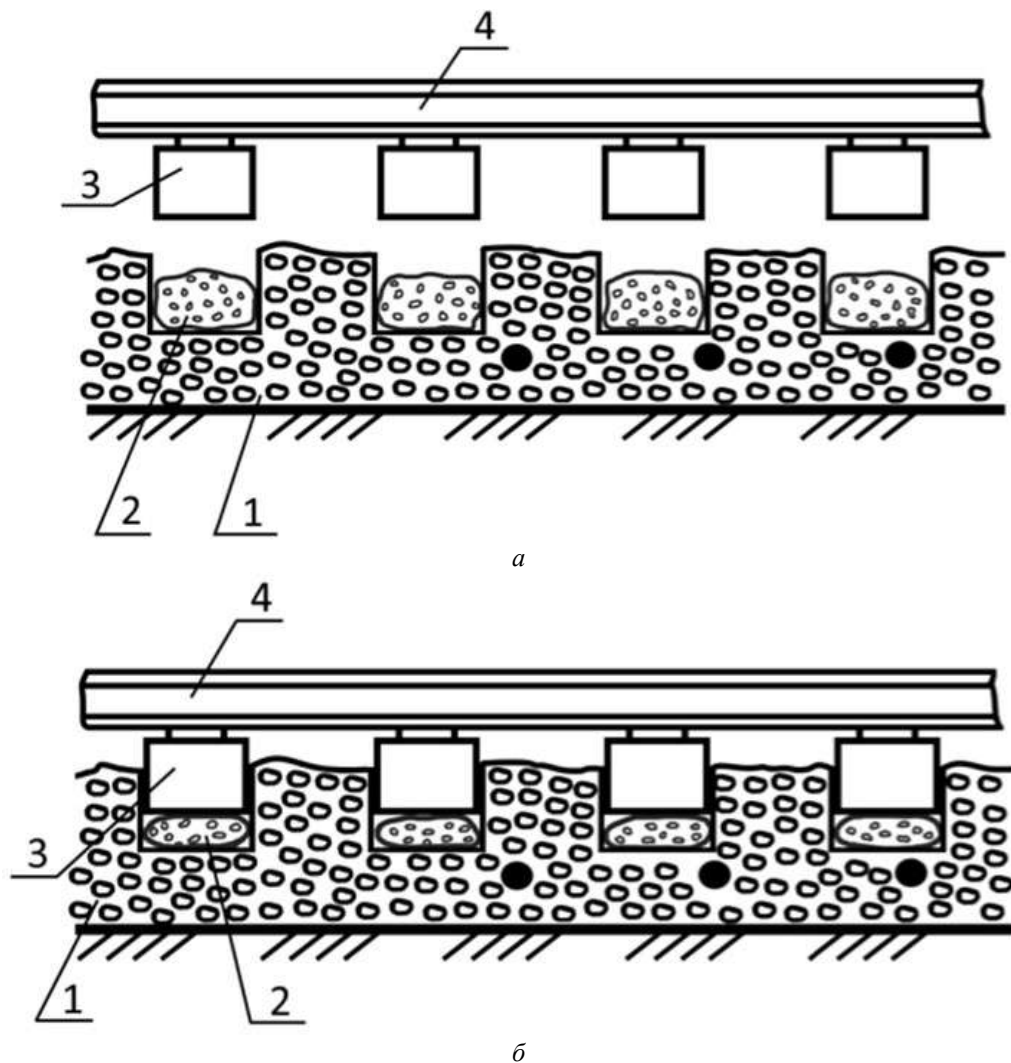


Рисунок 1 – Схема укладки перфорированных оболочек под шпалы: укладка оболочки под вывешенную шпалу (рельсошпальную решетку) (а); железнодородный путь после укладки в эксплуатацию (б)

Скорость истечения балласта из оболочки  $V$  зависит от размеров  $d_i$ , числа отверстий в оболочке  $n$ , веса поезда  $p$  и интенсивности движения на участке (поездов в час)  $w$ :  $V = f(d_i, n, p, w)$ .

Новая технология позволяет снизить динамическое воздействие на путь и скорость развития дефектов рельсов и заменить более дорогостоящую технологию укладки подбалластных матов согласно ГОСТ Р 70258–2022.

Динамическое воздействие подвижного состава на путь в этом случае может быть описано уравнением вертикальных колебаний плоского элемента с трансверсально-изотропными

механическими свойствами [7, 8] с постоянной толщиной  $2h$  и размерами в плане  $l_1$  и  $l_2$ , вдоль и поперек железнодорожного пути соответственно (вдоль осей  $x$  и  $y$ ):

$$A_1 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} + A_3 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta W + A_4 \Delta^2 W + A_5 \frac{\partial W}{\partial t} + A_6 \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} + A_7 \frac{\partial}{\partial t} \Delta = \frac{1}{\mu h} f_2(x, y, t), \quad (1)$$

где  $A_{ij}$  – характеристики, определяющие геометрическую и механическую анизотропию конструкции;  $W(x, y, t)$  – поперечные колебания точек плоскости  $z = 0$ .

Начальные условия нулевые:

$$W = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} = 0. \quad (2)$$

В силу четности функции  $f_z(x, y, t)$  решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$W(x, y, t) = \int_0^\infty \int_0^\infty W_0(k, q, t) \cos(kx) \cos(qy) dx dq. \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в уравнение (1), для  $W_0$  получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 W_0}{\partial t^4} + \frac{A_6}{A_2} \frac{\partial^3 W_0}{\partial t^3} + \frac{A_1 + A_3(k^2 + q^2)}{A_2} \frac{\partial^2 W_0}{\partial t^2} + \frac{A_5 + A_7(k^2 + q^2)}{A_2} \frac{\partial W_0}{\partial t} + \\ + \frac{A_4(k^2 + q^2)^2}{A_2} W_0 = \frac{1}{\mu A_2} f_0(k, q, t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_0(k, q, t) = \int_0^\infty \int_0^\infty f_z(x, y, t) dk dq$ .

Характеристическое уравнение для однородного уравнения (4) имеет вид:

$$\xi^4 + B_3 \xi^3 + B_2 \xi^2 + B_1 \xi + B_0 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} B_3 = \frac{A_6}{A_2}; B_2 = \frac{A_1 + A_3(k^2 + q^2)}{A_2}; \\ B_1 = \frac{A_5 + A_7(k^2 + q^2)}{A_2}; B_0 = \frac{A_4(k^2 + q^2)^2}{A_2}. \end{aligned}$$

Уравнение (5) имеет комплексные числа с отрицательными действительными частями, обозначим их:

$$\xi_{1,2} = -\alpha_1 \pm ip_1; \xi_{3,4} = -\alpha_2 \pm ip_2; (\alpha_j \geq 0). \quad (6)$$

Общее решение однородного уравнения (4) имеет вид:

$$W_{00} = e^{-\alpha_1 t} [C_1 \cos \beta_1 t + C_2 \sin \beta_1 t] + e^{-\alpha_2 t} [C_3 \cos \beta_2 t + C_4 \sin \beta_2 t]. \quad (7)$$

Частное решение неоднородного уравнения (4) находится методом вариации произвольных постоянных и имеет вид:

$$W_r = \frac{1}{\beta_1} \int_0^t F(k, q, t) e^{-\alpha_1(t-\xi)} \left\{ \frac{\Delta_1}{\Delta_0} \sin[\beta_1(t-\xi)] + \frac{\Delta_2}{\Delta_0} \cos[\beta_1(t-\xi)] \right\} d\xi + \frac{1}{\beta_2} \int_0^t F(k, q, t) e^{-\alpha_2(t-\xi)} \left\{ \frac{\Delta_3}{\Delta_0} \sin[\beta_2(t-\xi)] + \frac{\Delta_4}{\Delta_0} \cos[\beta_2(t-\xi)] \right\} d\xi, \quad (8)$$

где

$$F(k, q, t) = \frac{1}{h\mu A_2} f_0(k, q, t);$$

$$\Delta_0 = [(\beta_1^2 - \beta_2^2)^2 + 2(\alpha_1 - \alpha_2)^2(\beta_1^2 + \beta_2^2) + 4\alpha_1\alpha_2(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2];$$

$$\Delta_1 = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - \beta_1^2 + \beta_2^2 - 2\alpha_1\alpha_2); \Delta_2 = 2\beta_1\beta_2(\alpha_1 - \alpha_2);$$

$$\Delta_3 = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \beta_1^2 - \beta_2^2 - 2\alpha_1\alpha_2); \Delta_4 = -\Delta_2.$$

В случае, если рассматриваемый участок ограничен, два края пластины при  $y = 0, l_2$  шарнирно оперты, т. е.

$$W = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0, \text{ при } y = 0, l_2, \quad (9)$$

а два другие ( $x = 0, l_1$ ) имеют любые граничные условия.

Учитывая граничные условия (9), общее решение неоднородного уравнения имеет вид:

$$A_4 W_k(x) = \left[ \int_0^x \frac{\Delta_1(\eta) F_k(\eta)}{\Delta_0} d\eta + C_1 \right] f_1(x) - \left[ \int_0^x \frac{\Delta_2(\eta) F_k(\eta)}{\Delta_0} d\eta + C_2 \right] f_2(x) + \left[ \int_0^x \frac{\Delta_3(\eta) F_k(\eta)}{\Delta_0} d\eta + C_3 \right] f_3(x) - \left[ \int_0^x \frac{\Delta_4(\eta) F_k(\eta)}{\Delta_0} d\eta + C_4 \right] f_4(x). \quad (10)$$

при нулевых начальных условиях все  $C_j = 0$ .

Тем самым получено аналитическое решение задачи о колебании пластины, у которой два противоположных края шарнирно оперты, а два другие имеют произвольные граничные условия.

На рисунке 2 показано изменение вертикальных перемещений точек срединной поверхности шпалы на участке длиной  $L = 50$  м при движении экипажа с нагрузкой на ось в 25 т.

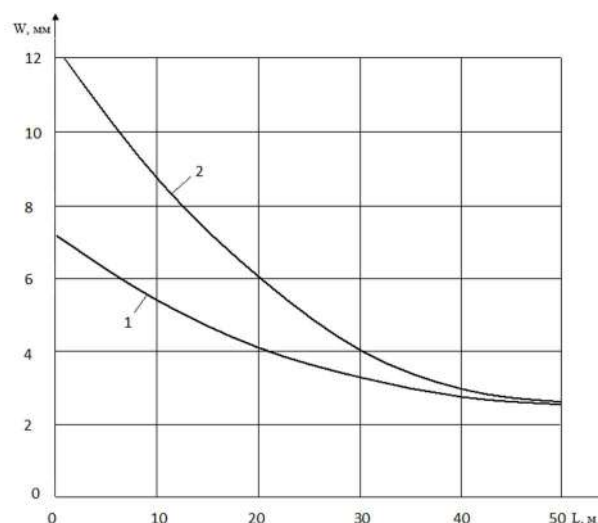


Рисунок 2 – Зависимость вертикального перемещения точек подрельсового основания от длины участка переменной жесткости

Кривая под номером 1 на рисунке 2 получена при превышении изгибной жесткости вдоль рельсов на 20 % над жесткостью вдоль шпал, а кривая под номером 2 – при равных параметрах жесткости плоского элемента в направлении вдоль рельсов и вдоль шпал. Фактически данные соотношения примерно соответствуют эпюрам шпал 2000 шп./км и 1840 шп./км. Графические зависимости имеют неярко выраженный экстремум, связанный с соотношением длины участка переменной жесткости и длиной вагона, т. е. фактически с количеством колесных пар, которые одновременно могут находиться на моделируемом плоском элементе.

Таким образом, наполняемые щебнем перфорированные оболочки прокладки укладываются в объеме работ, соответствующих объему работ по текущему содержанию пути, при этом жесткость пути распределяется равномерно, что позволяет избежать толчков и ударов. Варьируя параметры жесткости и геометрические характеристики, можно добиться, чтобы результирующие вертикальные перемещения не превышали нормативных значений, связанных со скоростью движения экипажа.

## Список литературы

1. Каменский, В. Б. Справочник дорожного мастера и бригадира пути / В. Б. Каменский, Л. Д. Горбов. – Москва : Транспорт, 1985. – 487 с. – Текст : непосредственный.
2. Певзнер, В. О. Проблемы ведения путевого хозяйства на современном этапе / В. О. Певзнер. – Текст : непосредственный // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : труды международной научно-технической конференции / ОАО «Российские железные дороги», Российский университет транспорта (МИИТ). – Москва, 2021. – С. 79.
3. Каплин, В. Н. Технология и определение применимости пневмосуфляжа при текущем содержании пути / В. Н. Каплин, А. А. Абрашитов, Е. Н. Гринь. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2020. – Т. 79. – № 2. – С. 74–79.
4. Абрашитов, А. А. Пневмосуфляж при выправке пути на щебёночном балласте / А. А. Абрашитов. – Текст : непосредственный // Мир Транспорта. – 2012. – Т. 10. – № 6 (44). – С. 56–60.
5. Патент № 2788986 Российская Федерация МПК E01B 27/18 (2006.01). Устройство и способ выравнивания рельсовых нитей по уровню распределением балласта под шпалу: № 2022120187 : заявлено 22.07.2022 : опубликовано 26.01.2023, Бюл. № 3 / Сычев В. П. – Текст : непосредственный.
6. Патент № 215860 Российская Федерация МПК E01B 27/02 (2006.01). Устройство распределения балласта под шпалы / № 2022127411 : заявлено 21.10.2022 : опубликовано 30.12.2022, Бюл. №1 / Сычев В. П. –Текст : непосредственный.
7. Sychev V.P., Ovchinnikov D.V., Abdurashitov A.Yu., Pokatsky V.A., Sycheva A.V. Ralls life cycle evaluation depending on the operating conditions. *AIP Conference Proceedings* 2476, 020010 (2023) doi: <https://doi.org/10.1063/5.0104545>.
8. Сычева, А. В. Энергетический подход к решению задачи взаимодействия колеса и рельса для железнодорожного пути оперативного развертывания / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 96–105.

## References

1. Kamensky V.B. Gorbov L.D. *Spravochnic dorozhnogo мастера I brigadira puti* [Handbook of road foreman and track foreman]. Moscow, Transport Publ., 1985, 487 p. (In Russian).
2. Pevzner V.O. [Problems of track management at the present stage]. *Sovremennyye problemy proektirovaniia, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii* (Modern problems of design, construction and operation of

railway tracks: International Scientific and Technical Conference proceedings). Moscow, 2021, pp. 79 (In Russian).

3. Kaplin V.N., Abrashitov A.A., Grin' E.N. Technology and determination of the applicability of stone blowing at the current track maintenance. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 2, pp. 74-79 (In Russian).

4. Abrashitov A.A. Pneumatic stone blowing for track straightening of stone bedded track. *Mir transporta – World Of Transport And Transportation*, 2012, vol. 10, no. 6 (44), pp. 56-60 (In Russian).

5. Sychev V.P. Patent RU 2788986, 26.01.2023.

6. Sychev V.P. Patent RU 215860, 30.12.2022.

7. Sychev V.P., Ovchinnikov D.V., Abdurashitov A.Yu., Pokatsky V.A., Sycheva A.V. Ralls life cycle evaluation depending on the operating conditions. *AIP Conference Proceedings* 2476, 020010 (2023) doi: <https://doi.org/10.1063/5.0104545>.

8. Sycheva A.V., Loktev A.A., Sychev V.P. Energy approach to solving the problem of interaction between a wheel and a rail for an operational deployment railway track. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 96-105 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Сычева Анна Вячеславовна

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (925) 506-87-69.

E-mail: [anna@vpm770.ru](mailto:anna@vpm770.ru)

### Локтев Алексей Алексеевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Доктор физико-математических наук заведующий кафедрой «Транспортное строительство».

Тел.: +7 (495) 649-19-78.

E-mail: [aaloktev@yandex.ru](mailto:aaloktev@yandex.ru)

### Сычев Вячеслав Петрович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, ГСП-4, 125190, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство».

Тел.: +7(985) 774-26-84.

E-mail: [vp@vpm770.ru](mailto:vp@vpm770.ru)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сычева, А. В. Снижение динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь применением новой технологии распределения балласта / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 82 – 88.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sycheva Anna Vyacheslavovna

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport construction», RUT (MIIT).

Phone: +7 (925) 506-87-69.

E-mail: [anna@vpm770.ru](mailto:anna@vpm770.ru)

### Loktev Alexey Alekseevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, head of the department «Transport construction», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-78.

E-mail: [aaloktev@yandex.ru](mailto:aaloktev@yandex.ru)

### Sychev Vyacheslav Petrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztsova st., Moscow, GSP-4, 125190, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport construction», RUT (MIIT).

Phone: +7(985) 774-26-84.

E-mail: [vp@vpm770.ru](mailto:vp@vpm770.ru)

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sycheva A.V., Loktev A.A., Sychev V.P. Reducing the dynamic impact of rolling stock on the railway track by using new technology for ballast distribution. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 82-88 (In Russian).

## ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНОГО ПОДХОДА СЕВЕРОМУЙСКОГО ТОННЕЛЯ

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа материалов различных видов обследования деформаций земляного полотна станции Казанкан, полученные за значительный период времени (около 30 лет). Методология проведенной работы основана на многолетних визуальных осмотрах авторами, анализе данных термометрии, инженерно-геологического бурения и геофизического мониторинга деградации многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна. Установлено, что причины многолетних интенсивных деформаций земляного полотна станции Казанкан обусловлены наличием чрезвычайно сложных сейсмотектонических, геологических и гидрогеологических условий. Наибольшее влияние на долготермное развитие деформаций оказывают многолетнемерзлые грунты в основании земляного полотна, представленные супесями льдистыми текучей консистенции при оттаивании, наличие трещинных подземных вод, фильтрующих по тектоническим разломам, тепляющее воздействие которых на многолетнемерзлые грунты вызывает проявление процессов термосуффозии. Активная тектоника приводит к закрытию старых и появлению новых трещин, что обуславливает собой блуждающий характер путей фильтрации подземных вод.

Все это вместе взятое не позволяет до настоящего времени определить комплекс причин проявления деформаций и, в свою очередь, не обеспечило стабилизацию деформаций за счет разработанных ранее большого количества проектов по капитальному ремонту земляного полотна.

Цель статьи – показать, что дальнейшие изыскания и всевозможные проекты по капитальному ремонту не обеспечат прекращение деформаций земляного полотна. Результаты статьи могут быть использованы при проектировании глубокого обхода станции Казанкан совместно с предлагаемым авторами ранее обходом Северомуйского тоннеля, что позволит исключить два самых опасных и барьерных места на сети железных дорог ОАО «РЖД»: станцию Казанкан и Северомуйский тоннель.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, деформации основания, деградация многолетнемерзлых грунтов, оползневые деформации, фильтрация подземных вод, термосуффозия, сейсмическое зондирование, GPS-съёмка, сезонные охлаждающие установки, режимные наблюдения.

Andrei I. Bogdanov, Sergey V. Kvashuk

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

## DYNAMICS OF CHANGES IN GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE EASTERN APPROACH OF THE SEVERO-MUYSKY TUNNEL

**Abstract.** The article presents the results of the analysis of the materials of various types of deformation survey of the roadbed of the Kazankan station, obtained over a significant period of time (about 30 years). The methodology of the work is based on many years of visual inspections by the authors, analysis of thermometry data, engineering and geological drilling and geophysical monitoring of the degradation of permafrost soils at the base of the roadbed. The article shows that the causes of long-term intensive deformations of the roadbed of the Kazankan station are due to the presence of extremely complex seismotectonic and hydrogeological conditions. The greatest impact on the long-term development of deformations is exerted by permafrost soils at the base of the roadbed, represented by icy sandy loams of flowing consistency during thawing, the presence of fissured groundwater filtering along tectonic faults, the warming effect of which on permafrost soils causes the manifestation of the process of thermosuffusion. Active tectonics leads to the closure of old cracks and the appearance of new ones, which causes the wandering nature of ground-water filtration paths.

All this taken together does not allow us to determine the complex of causes of deformations and, in turn, did not ensure the stabilization of deformations due to the previously developed large number of projects for the overhaul of the roadbed. The purpose of the article is to show that further surveys and all kinds of projects for major repairs will not ensure the cessation of deformations of the roadbed. The results of the article can be used in the design of a deep bypass of the Kazankan station together with the previously proposed bypassing of the Severo-Muysky tunnel, which will eliminate the two most dangerous and barrier places on the railway network of Russian Railways: the Kazankan station and the Severo-Muysky tunnel.

**Keywords:** permafrost soils, roadbed, base deformations, degradation of permafrost soils, landslide deformations, groundwater filtration, thermosuffusion, seismic sounding, GPS surveying, seasonal cooling units, regime observations.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Земляное полотно станции Казанкан отсыпано зимой 1982 – 1983 гг. под два главных и два приемоотправочных пути шириной поверху 20 – 25 м в зоне распространения вечномерзлых грунтов.

Участок пути запроектирован по склону восточной экспозиции с уклоном от 12 до 17° (рисунок 1), сложенный главным образом отложениями флювиогляциального генезиса, такими как пески, супеси, суглинки, становящиеся пластичными при замачивании и приобретающие тиксотропные свойства. Некоторые участки верхней части склона лишены растительности.

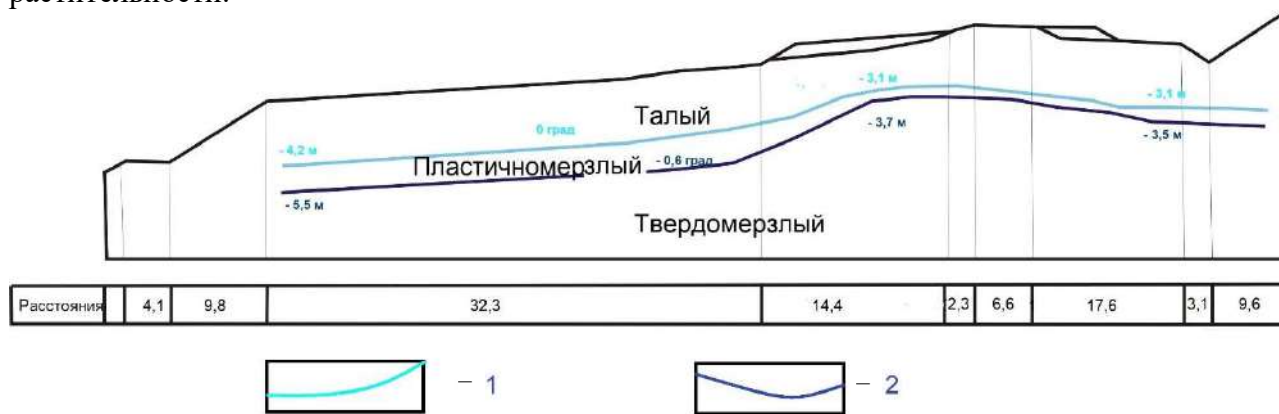


Рисунок 1 – Схематичный поперечный профиль участка, отражающий залегание твердомерзлых, пластичномерзлых и талых грунтов: 1 – глубина залегания и граница перехода талого грунта в пластичномерзлый, определенная температурными замерами; 2 – глубина залегания и граница перехода пластичномерзлого грунта в твердомерзлый, определенная температурными замерами

Здесь проявляются значительные деформации основания железнодорожного пути, причинами которых служат взаимосвязанные процессы:

- деградация многолетнемерзлых грунтов в районе исследований;
- термосуффозия оттаивающих многолетнемерзлых грунтов под отепляющим воздействием подземных вод;
- оползневые деформации склона.

Основную опасность в деформации железнодорожного пути, мостов и труб представляют оползневые подвижки.

Обследования земляного полотна с проведением комплекса инженерно-геологических, геокриологических и геофизических исследований с целью установления причин деформаций и назначения противодеформационных мероприятий проводились неоднократно ведущими ПИИ страны («Сибгипротрансом» (1984, 1986, 1993 гг.), «Мосгипротрансом» (1995 – 1996 гг.); Новосибирским филиалом «Гипротранспуть» (1998, 2001, 2008 гг.); «Иркутскжелдор-проектом» (2002 – 2005 гг.), Тындинской мерзлотной станцией), которые завершались разработкой рекомендаций и мероприятий по стабилизации этого участка.

**Ретроспективный анализ изменения инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий станции Казанкан.** Земляное полотно станции Казанкан деформируется с начала эксплуатации и до настоящего времени на протяжении более 40 лет. Станционные пути деформировались один за другим и закрывались для движения поездов. Общий вид станции до и после разборки станционных путей в 1998 и 2002 гг. показан на рисунках 2 и 3.

Анализ фотоизображения показывает, что станционные пути, находящиеся в одном уровне после строительства, претерпели осадку в пределах 1 – 2 м, после чего были демонтированы.

В зимний период 1999 – 2000 гг. сооружен обходной путь, сдвинутый в нагорную сторону от II пути на 15 – 20 м. Движение поездов по этому пути открыто в мае 2000 г.

Проведенные инструментальные наблюдения установили наличие осадок обходного пути и опор мостов на этом участке величиной до 400 мм и продольного смещения западного устоя первого моста, что привело к защемлению пролетного строения [1].



Рисунок 2 – Вид станции Казанкан до разборки путей, 1998 г.



Рисунок 3 – Вид станции Казанкан после разборки путей и состояние земляного полотна, декабрь 2002 г.

Площадь оттаивания грунтов включает в себя тело насыпи с выполненными противодеформационными мероприятиями и затрагивает грунты основания, представленные супесью и суглинками, слабо льдистыми, пластично мерзлыми, переходящими в текучие состояния при оттаивании.

Отмеченные факторы создали благоприятные условия возникновения склоновых гравитационных процессов: сползания, сплыва, оползня и термосуффозии [5].

Теплотехнические расчеты показали необходимость применения охлаждающих мероприятий для предотвращения протаивания и понижения температуры мерзлых грунтов основания земляного полотна до температуры их твердомерзлого состояния, требуемого СП [3].

В 2001 г. были отсыпаны охлаждающие скальные бермы. В 2003 г. в целях ускорения стабилизации температурного режима в основании пути дополнительно к скальным конструкциям установили три ряда жидкостных сезонно-действующих охлаждающих установок (СОУ).

После выполнения комплекса противодеформационных мероприятий склоновые гравитационные процессы не затухали и не останавливались, а, наоборот, продолжали развиваться.

Убедительной иллюстрацией тому является оценка состояния земляного полотна в 2003 г. и по прошествии пяти лет после установки СОУ – рисунки 4 и 5, которые подтверждают, что устройство СОУ не привело к стабилизации деформаций земляного полотна.

Режимными геодезическими наблюдениями установлено, что деформации земляного полотна станции Казанкан продолжались в этот период, величина которых составила до 2,0 м.

В логу ниже второго моста в ходе визуального осмотра были обнаружены суффозионные воронки (рисунок 6), на месте которых под действием фильтрации подземных вод в течение трех лет образовался сплошной овраг (рисунок 7). Еще через два года – в 2010 г. – овраг заполнился суффозионными выносами и рост его прекратился, что указывает на блуждающий характер фильтрации подземных вод, обусловленный активной тектоникой.

В основании земляного полотна происходит фильтрация грунтовых вод, которая не перехватывается имеющимися дренажами и мерзлой зоной от работы СОУ и под воздействием которой в логу второго моста образовалась воронка глубиной 3 – 4 м. Наиболее

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

интенсивные фильтрационные потоки приурочены к первому мосту, где зимой 2004 – 2005 гг. с низовой стороны образовался значительного объема гидролакколит.



Рисунок 4 – Состояние главного пути на ст. Казанкан. Все СОУ после устройства находятся в одном уровне, их высота составляет около 3 м, октябрь 2003 г.

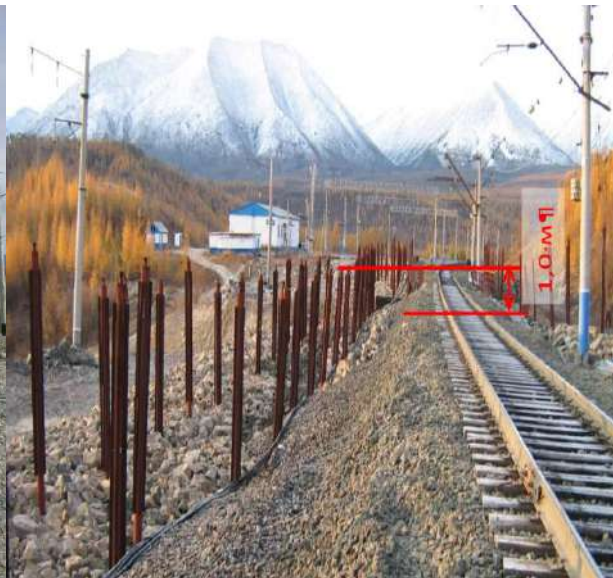


Рисунок 5 – Просадка земляного полотна и скальной охлаждающей конструкции на ст. Казанкан. Высота СОУ у моста менее 1 м, октябрь 2008 г.



Рисунок 6 – «Пьяный» лес и воронки в районе второго моста в русле ключа, образующиеся в результате термосуффозии и солифлюкции, август 2005 г.



Рисунок 7 – Овраг в районе второго моста в русле ключа, в котором откладываются продукты суффозии (показано стрелкой), мощность которых достигает 1 м/год и более, сентябрь 2008 г.

Для выявления причинно-следственных связей между величинами деградации многолетней мерзлоты и деформациями в периоды 2008 – 2009 и 2011 – 2012 г.г. проведены режимные геодезические наблюдения.

На рисунках 8 и 9 показаны совмещенные карты-схемы глубин залегания верхней границы вечномерзлых грунтов (ВГВМ) и деформации земляного полотна в периоды 2008 – 2009 и 2011 – 2012 гг.

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

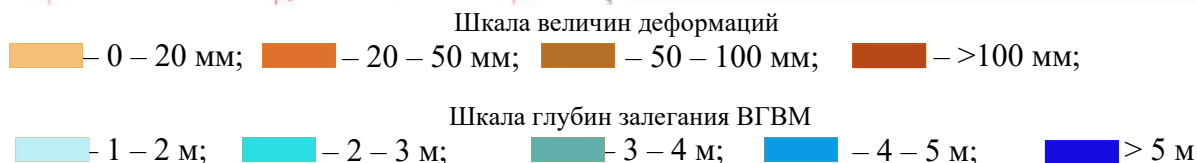
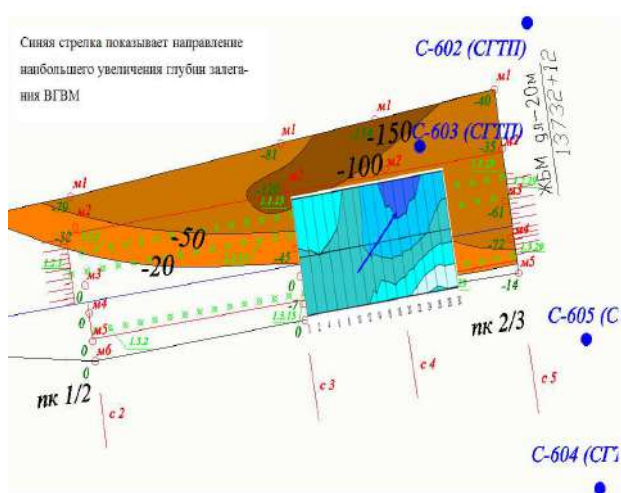
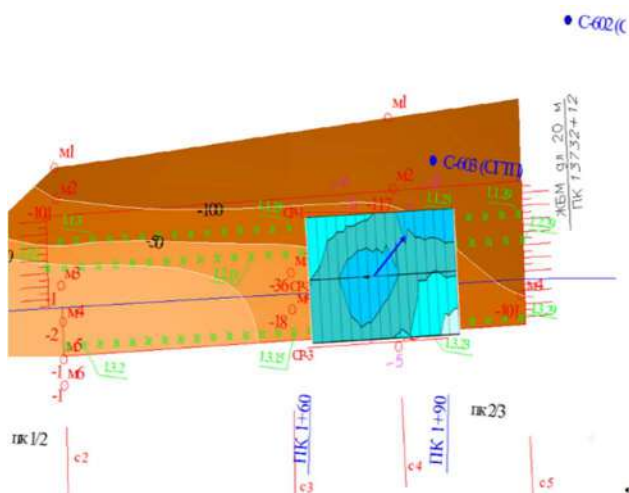


Рисунок 8 – Карта-схема глубин залегания ВГВМ и деформаций земляного полотна за 2008 – 2009 гг.

Рисунок 9 – Карта-схема глубин залегания ВГВМ деформаций земляного полотна за 2011 – 2012 гг.

Анализ показывает, что увеличение деформаций земляного полотна и синхронное ему увеличение глубин залегания ВГВМ происходит в юго-западном направлении с верховой (правой) в низовую (левую) сторону от земляного полотна.

На рисунке 10 приведены фото земляного полотна станции Казанкан в районе первого моста и карта-схема увеличения глубин залегания ВГВМ за период 2009 – 2012 гг.

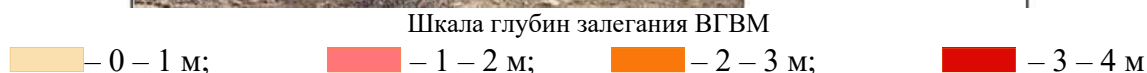
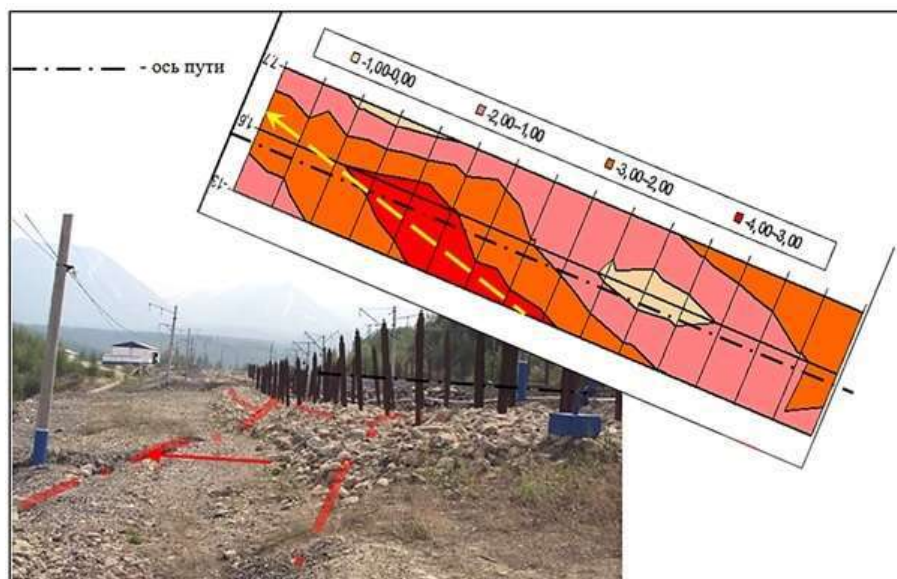


Рисунок 10 – Земляное полотно в районе первого моста ПК 2+12 и карта-схема увеличения глубин залегания ВГВМ за период 2009 – 2012 гг.

Направление наибольшего увеличения глубин залегания ВГВМ (стрелка на схеме) совпадает с направлением простираем трещины отрыва левого откоса земляного полотна

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

(пунктир на фото показан стрелкой), которая затем пересекает ось пути и выходит на правый откос. Максимальные увеличения глубин залегания ВГВМ достигают значений 3 – 4 м.

Осадка СОУ, погруженных на глубину 7 – 9 м показывает, что причина деформаций земляного полотна на ст. Казанкан находится на больших глубинах, ниже зоны действия СОУ.

Верхняя граница многолетнемерзлых грунтов находится на глубинах порядка 17 м и является водоупором подземного водоносного горизонта, приуроченного к прослоям супесей, по которым формируются зоны скольжения. Кровля водоносных слоев не образует единого горизонта, имеет абсолютные отметки с перепадом 25 м.

При бурении скважинами вскрыты водоносные слои как в зоне сезонного промерзания-оттаивания от 4,7 м, так и на глубинах до 17 м от поверхности, их мощность колеблется от 0,3 до 1,3 м и дренирование по ним грунтовых и жильных вод создает отепляющий эффект для деградации вечномерзлых грунтов. На глубинах в интервале 10 – 17 м встречаются грунты с вялой мерзлотой, отдельные водонасыщенные трещины и жилы, по которым возможна разгрузка глубинных вод, приводящая к обводнению склона.

По результатам изысканий, проведенных в период 1998 – 2008 гг. институтами «Сибгипротранс», «Мосгипротранс», Новосибирским филиалом «Гипротранспуть», «Иркутскжелдор-проектом» и Тындинской мерзлотной станцией, сделаны следующие выводы о причинах деформаций земляного полотна на ст. Казанкан:

развитие оползневых процессов обусловлено деградацией многолетней мерзлоты вследствие отепляющего эффекта дренирующих грунтовых и жильных вод по кровле многолетнемерзлых пород;

основные деформации земляного полотна представляют собой вертикальные и горизонтальные смещения, приуроченные к двум зонам, называемым «оползневыми цирками». Первый расположен в пределах западного (первого) моста (рисунок 11), а второй объединяет участок расположения среднего и восточного (второго и третьего) мостов (рисунок 12).

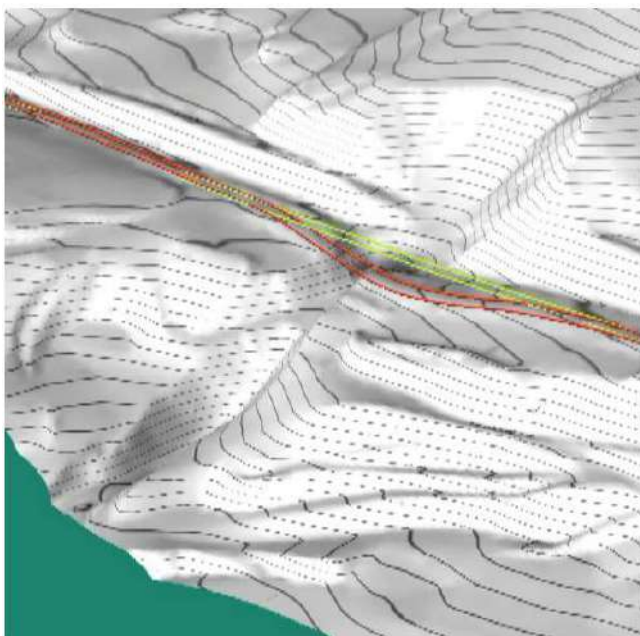


Рисунок 11 – Реконструкция объемного представления оползневого процесса в районе первого моста (по данным Института земной коры СО РАН)

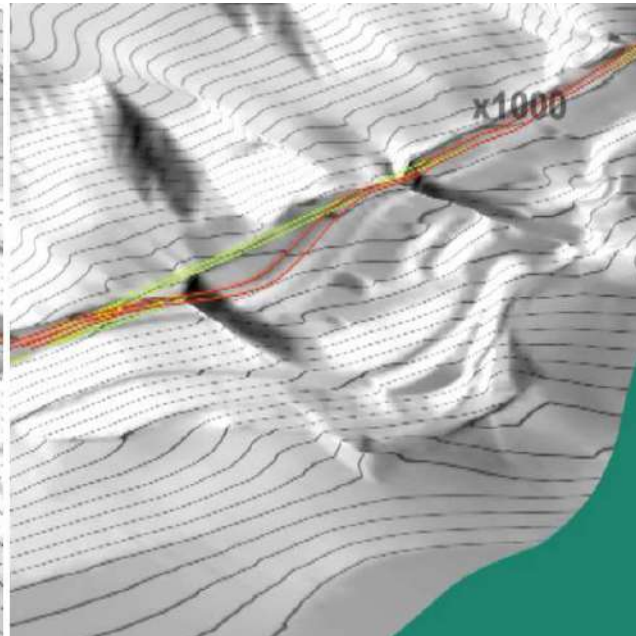


Рисунок 12 – Реконструкция объемного представления оползневого процесса в районе второго и третьего мостов (по данным Института земной коры СО РАН)

Дополнительным негативным фактором проявления оползневых процессов явилась нагрузка от давления веса насыпных грунтов земляного полотна и от динамических

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

воздействий при движении поездов на слабые при оттаивании подстилающие слои в основании.

По результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных ООО «НИИ ГЕОТЕХ», кровля мерзлоты на профиле по данным электроразведки практически не выявлена из-за схожих сопротивлений маловлажных песков и валунно-галечниковых грунтов и тех же грунтов, находящихся в мерзлом состоянии. На итоговых геолого-геофизических разрезах кровля ВГВМ выносилась по данным сейморазведки МПВ (метода преломленных волн).

На сейсмотомографических разрезах (рисунки 13 и 14) показано распределение значений скоростей распространения продольных волн [6].

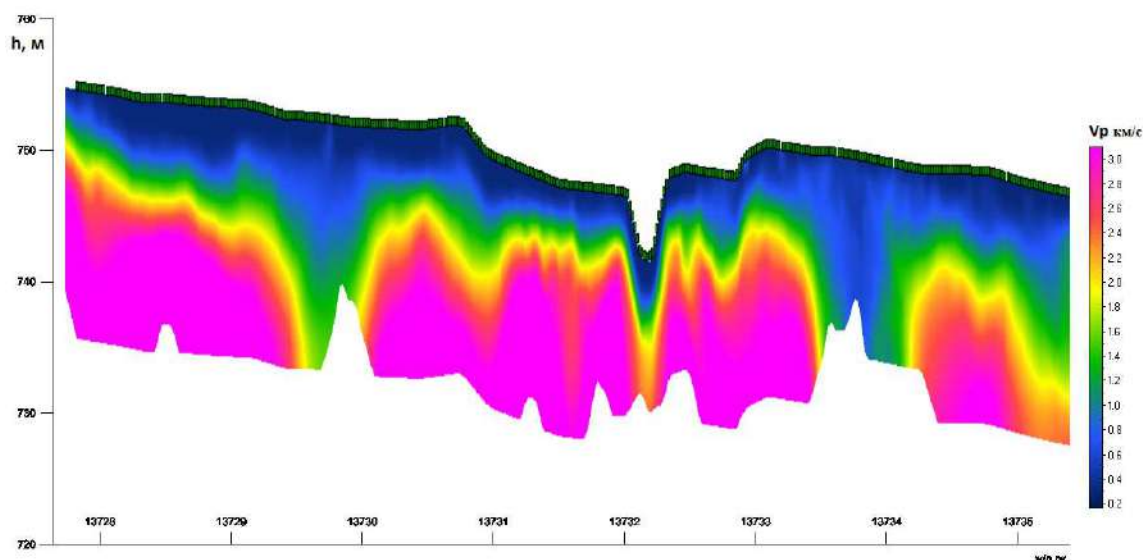


Рисунок 13 – Профиль 1. Скоростной разрез  $V_p$  (по данным ООО «НИИ ГЕОТЕХ»).  
Справа – шкала скоростей продольных сейсмических волн

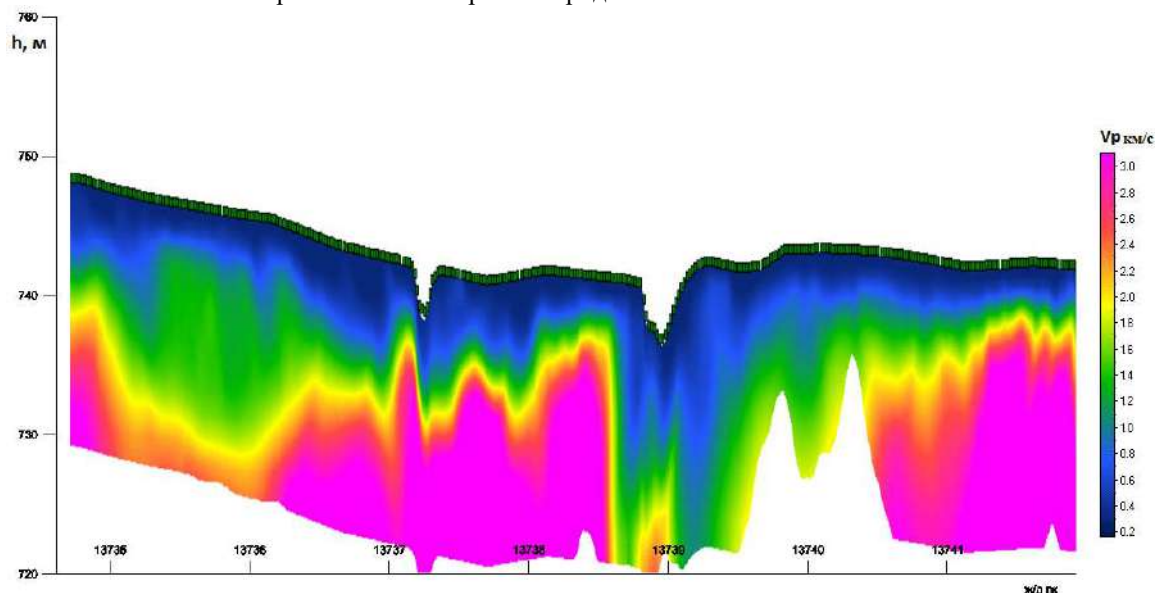


Рисунок 14 – Профиль 2. Скоростной разрез  $V_p$  (по данным ООО «НИИ ГЕОТЕХ»).  
Справа – шкала скоростей продольных сейсмических волн

В целом разрез характеризуется значительной изменчивостью по скоростным свойствам как по глубине, так и вдоль профиля, и если сравнивать его с профилем 3, можно отметить, что скорости на нем несколько ниже, что говорит о меньшей уплотненности грунтов, слагающих разрез вдоль профиля 2. В общей сложности было выделено четыре крупных зоны протаивания общей протяженностью 490 м.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Один из участков протяженностью 70 м характеризуется отсутствием многолетнемерзлых пород, которые играли бы роль водоупорного горизонта, и относительно низкими значениями скоростей продольных волн (800 – 1000 м/с), характерными для влажных/маловлажных грунтов, на глубинах от 2 – 3 до 12 м. Все это свидетельствует о сильно выраженных фильтрационных процессах.

Реализованные в период 1998 – 2015 гг. технические решения для ликвидации деформаций земляного полотна на разъезде Казанкан по замене труб на мосты, устройству сезонных охлаждающих установок по левой и правой сторонам пути с применением крупно-обломочной скальной охлаждающей конструкции и креплением элементов водоотводных русел камнем не привели к стабилизации деформаций земляного полотна.

Затраты в период 2013 – 2017 гг. на капитальный ремонт земляного полотна ст. Казанкан в размере 1975 млн руб. в таких сложных геологических, гидрогеологических, геокриологических и сейсмотектонических условиях не привели к стабилизации деформаций земляного полотна ст. Казанкан.

В апреле 2015 г. в ОАО «РЖД» принято решение о производстве новых геологических изысканий по объекту «Разъезд Казанкан» с определением причин сползания склона.

В период 2019 – 2021 г.г. на участке деформаций земляного полотна проведены следующие работы:

- устройство охлаждающих скальных конструкций для сохранения многолетнемерзлых грунтов в мерзлом состоянии;
- демонтаж существующей нерабочей системы охлаждающих устройств и установка новых термостабилизаторов в количестве 1074 шт.;
- устройство сетчатого покрытия на скально-обвальном участке 1375 км ПК 3,50 – 1375 км ПК 9,50;
- устройство водоотводных сооружений по двухэтапной технологии;
- устройство дренажей.

Обследования показали, что деформации основания земляного полотна на станции Казанкан продолжают, имеют совершенно аналогичный характер тем деформациям, которые были изучены и описаны более 20 лет назад, а именно: в период снеготаяния и летних ливней, землетрясений происходят и будут происходить в дальнейшем оползание, осыпание и сплывы грунта в устроенные водоотводные сооружения, быстротоки, русла мостов, зарабатывая их и уменьшая их сечение и водопропускную способность, деградация многолетнемерзлых грунтов и термосуффозии и, как следствие, осадки земляного полотна.

На отдельных участках происходит обводнение земляного полотна и прилегающей территории, а в зимний период наблюдается образование наледи.

В ходе обследования выявлены осадки пути на участках протяженностью 465 м (рисунок 15).



а

б

Рисунок 15 – Осадки пути на разных участках станции Казанкан (2023 г.) по данным инженерно-геологической базы ст. Северобайкальск

За время эксплуатации разъезда Казанкан были вложены колоссальные средства для стабилизации деформаций. Тем не менее они продолжают, и нормальная эксплуатация данного разъезда затруднена ввиду сложных геологических условий.

Наиболее эффективные мероприятия по ликвидации двух барьерных мест – ст. Казанкан и Северомуйского тоннеля – это изыскания, проектирование и строительство глубокого обхода неблагоприятных участков, приведенного на рисунке 16, что было предложено авторами ранее [2].

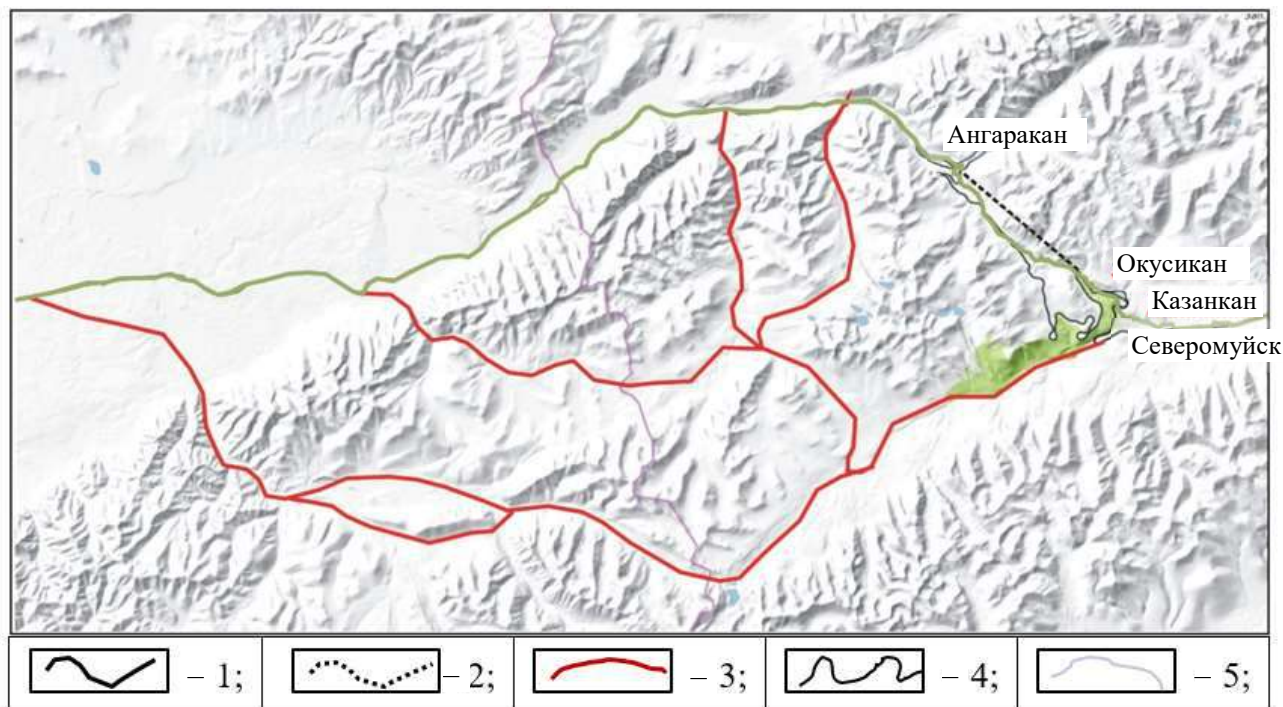


Рисунок 16 – Бестоннельные варианты пересечения Северо-Муйского хребта:

1 – трасса БАМа; 2 – Северомуйский тоннель; 3 – варианты бестоннельного пересечения Северомуйского хребта; 4 – существующий обход Северомуйского тоннеля; 5 – административная граница

Положение каждого варианта отличается длиной, использованием попутных долин для пересечения Северо-Муйского хребта, выходом в долину реки Ангаракан и на существующую трассу БАМ.

По предварительным оценкам, сделанным по топографическим картам из открытого доступа и космическим снимкам, длина предлагаемых вариантов обхода Северомуйского тоннеля будет находиться в пределах от 100 до 200 км.

По отчетным данным ЦУКСа ОАО «РЖД» ориентировочная стоимость строительства 1 км новых железных дорог в условиях Восточного полигона составляет от 100 до 250 млн руб./км. Таким образом, стоимость строительства предлагаемых вариантов обхода Северомуйского тоннеля составит от 10 до 50 млрд руб.

Опасными обстоятельствами эксплуатации Северомуйского тоннеля и его подходов, определяющими его высокую уязвимость в случаях экстремальных, катастрофических событий, являются такие:

- высокая сейсмическая опасность района эксплуатации тоннеля и подходов к нему;
- сложные инженерно-геологические, геокриологические и гидрогеологические условия подходов к тоннелю и в пределах самого тоннеля;
- высокая опасность проявлений горного давления, деформации сводов тоннеля, интенсивные водопровывания в тоннеле;
- значительная уязвимость в случаях террористических атак и нарушений эксплуатации тоннельного перехода, таких как, например, произошедших 01.12.2023 [4].

Выбор окончательного варианта должен быть сделан на основе уточнения их положения трассированием по картам с учетом характера геологических, гидрогеологических и геокриологических условий и технико-экономических показателей установленных вариантов.

На основе результатов, изложенных в статье, сделаны следующие выводы.

1. До настоящего времени основной причиной деформаций земляного полотна станции Казанкан являлась деградация многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна.

2. Деградация многолетнемерзлых грунтов достоверно проявляется через осадку СОУ, установка верха которых была выполнена в одном уровне (см. рисунок 4) и который позднее отличался на 1 – 2 м (см. рисунок 5). Последнее указывает на то, что причина деформаций лежит ниже зоны действия СОУ – по данным наблюдений до демонтажа сезонных охлаждающих установок.

3. В статье показано, что кроме деградации многолетнемерзлых грунтов одной из главных причин деформаций земляного полотна станции Казанкан является термосуффозия. Термосуффозия отчетливо проявилась в русле ручья второго моста с низовой стороны с образованием воронок и «пьяного» леса (см. рисунок 6) и затем полного оврага (см. рисунок 7). У подошвы насыпи образовалась воронка глубиной 3 – 4 м с «водопадом» поверхностной воды и верховодки. По дну воронки вытекала подземная вода белого цвета, что является доказательством проявления термосуффозии.

4. Еще одной причиной деформаций земляного полотна станции Казанкан является оползень коренного склона, зафиксированный данными GPS-съемки и геодезических наблюдений. Наиболее активно оползневой процесс проявляется в районе второго и третьего мостов (см. рисунки 11 и 12).

5. Растепление многолетнемерзлых грунтов происходит под действием межмерзлотных и трещинных грунтовых вод с дальнейшим выносом мелкозернистых фракций и воронкообразными просадками земляного полотна, скальной охлаждающей конструкции с СОУ и прилегающей местности.

6. Еще одной неблагоприятной причиной деформаций является «блуждающий» характер путей фильтрации подземных вод, что может быть связано только с активной тектоникой и что также подтверждает прекратившийся поток подземных вод и рост оврага.

Таким образом, виды и сложность геокриологических, гидрогеологических и тектонических условий района расположения станции Казанкан и многолетние и разнообразные капитальные ремонты делают нецелесообразным следующие капитальные ремонты земляного полотна, которые, очевидно, не приведут к стабилизации деформаций земляного полотна.

Ранее авторами была показана нецелесообразность строительства второго Северомуйского тоннеля вблизи существующего, строительство которого продолжалось почти 30 лет и который в настоящее время испытывает серьезные деформации, вследствие чего актуален вопрос о его реконструкции.

Поэтому наиболее целесообразно проектирование бестоннельного глубокого обхода станции Казанкан и Северомуйского тоннеля (см. рисунок 16), предложенного авторами [2], что позволит исключить сразу два самых неблагоприятных барьерных места на сети железных дорог ОАО «РЖД» – станцию Казанкан и Северомуйский тоннель.

### *Список литературы*

1. Алексеев, А. Г. Прогнозирование температурного состояния мерзлых грунтов в связи с изменением климата / А. Г. Алексеев, Д. В. Зорин. – Текст : непосредственный // Вестник НИЦ «Строительство». – 2019. – № 4 (23). – С. 44–49.

2. Богданов, А. И. Проблемы эксплуатации и реконструкции Северо-Муйского тоннеля / А. И. Богданов, С. В. Квашук. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 3 (36). – С. 15–22.

3. Геотехнический мониторинг несущей способности фундаментов транспортных сооружений при деградации многолетнемерзлого основания / С. А. Кудрявцев, А. В. Кажарский [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4 (25). – С. 90–95.

4. К оценке рисков строительства тоннелей ТК № 1 совмещенной дороги Адлер – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» / Г. Н. Полянкин, А. Г. Полянкин, Д. А. Анощенко, Е. С. Бородина. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 28. – С. 131–140.

5. Сахаров, И. И. Пространственные и деформационные расчеты при усилении оснований объектов криолитозоны / И. И. Сахаров. – Текст : непосредственный // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике : сборник трудов конференции. – Салехард, 2021. – С. 370–373.

6. Сахаров, И. И. Современный подход к температурным и деформационным расчетам оснований объектов криолитозоны / И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов, М. В. Парамонов. – Текст : непосредственный // Геотехника. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 34–43.

7. СП 238.1326000.2015 Железнодорожный путь / Утв. приказом Минтранса России № 209 от 06.07.2015. – Москва, 2015. – 71 с. – Текст : непосредственный.

8. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор / В. Г. Чевеверев, Е. В. Сафронов, А. Г. Алексеев, Э. С. Гречищева. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 2022. – Т. 17. – № 1. – С. 64–72.

### References

1. Alekseev A., Zorin D. Prediction of the thermal state of frozen soils in connection with climate change. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2019, no. 4 (23), pp. 44-49 (In Russian).

2. Bogdanov A.I., Kvashuk S.V. Problems of operation and reconstruction of the North Muisk tunnel. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2023, no. 3 (36), pp. 15-22 (In Russian).

3. Kudryavtsev S.A., Kazharskiy A.V., Faleeva E.V., Gavrilov I.I., Bugunov S.A., Kotenko Zh.I., Shemyakin V.Yu. Geotechnical monitoring of carrying capacity of transport facilities during degradation of permafrost. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2020, no. 4 (25), pp. 90-95 (In Russian).

4. Poliankin G.N., Poliankin A.G., Anoshenko D.A., Borodina E.S. To assess the risks of construction the tunnels of Tunnel Complex № 1 of the combined way Adler – Alpika-Service Mountain Climatic Resort. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2012, no. 28, pp. 131-140 (In Russian).

5. Sakharov I.I. [Spatial and deformation calculations when strengthening the foundations of permafrost objects]. *Sovremennye issledovaniia transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike: sbornik trudov konferentsii* [Modern studies of cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic: proceedings of the conference]. Salekhard, 2021, pp. 370-373 (In Russian).

6. Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.V. A modern approach to the temperature and deformation calculations of the bases of objects in the cryolithozone. *Geotekhnika – Geotechnics*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 34-43 (In Russian).

7. SP 238.1326000.2015 Railway track / Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 209 dated 06.07.2015. Moscow, 2015, 71 p. (In Russian).

8. Cheverev V.G., Safronov E.V., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S. Laboratory methods for determining the thermophysical characteristics of frozen and thawed soils: analytical review. *Inzhenernaia geologiia – Engineering Geology World*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 64-72 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Богданов Андрей Иванович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (914) 413-01-36.

E-mail: abogdanov561@yandex.ru

### Квашук Сергей Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения», ДВГУПС.

Тел.: +7 (914) 544-34-21.

E-mail: s\_kvashuk@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Богданов, А. И. Динамика изменения геокриологических условий восточного подхода Северомуйского тоннеля / А. И. Богданов, С. В. Квашук. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 89 – 100.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Bogdanov Andrey Ivanovich

Far Eastern State University of Railway Engineering (FESTU).

Seryshev st., 47, Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Survey and Design of Railways and Highways (FESTU).

Phone: +7 (914) 413-01-36.

E-mail: abogdanov561@yandex.ru

### Kvashuk Sergey Vladimirovich

Far Eastern State University of Railway Engineering (FESTU).

Seryshev st., 47 Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, professor of the department of Bridges, Tunnels and Underground Structures, FESTU.

Phone: +7 (914) 544-34-21.

E-mail: s\_kvashuk@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bogdanov A.I., Kvashuk S.V. Dynamics of changes in the geocryological conditions of the eastern approach of the Severo-Muysky tunnel. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 89-100 (In Russian).

УДК 621.6.03

**Е. Н. Слободина, А. М. Парамонов, И. А. Степашкин, А. Г. Михайлов**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

**Аннотация.** Традиционные теплоносители обладают определенными ограничениями в применении из-за их относительно низких теплофизических свойств. Добавление наноразмерных частиц в базовую жидкость вызывает улучшение данных свойств теплоносителей и является импульсом к развитию исследований свойств теплоносителей следующего поколения – наножидкостей. В статье рассмотрены методы получения наножидкостей – одностадийный, который заключается в одновременном синтезе и диспергировании наночастиц в базовой жидкости, и двухстадийный метод, основанный на раздельном синтезе и диспергировании наночастиц в базовой жидкости. В рассмотренных исследованиях применен двухстадийный метод получения наножидкостей. В данной статье рассматриваются преимущества применения наножидкостей в качестве теплоносителя в сравнении с традиционным теплоносителем – водой. Особое внимание уделяется наножидкостям на основе диоксида кремния  $SiO_2$ . В работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при течении наножидкости на основе диоксида кремния  $SiO_2$  и воды при ламинарном режиме. В статье рассматривается влияние концентрации наночастиц диоксида кремния  $SiO_2$  на теплопроводность и вязкость полученной наножидкости. Представлена схема установки для экспериментального изучения процессов теплообмена при течении наножидкостей. Описаны принцип работы и основные элементы экспериментальной установки. Показано, что увеличение концентрации наночастиц ведет к росту коэффициента теплоотдачи в пределах 30 % по сравнению с традиционным теплоносителем – водой. В статье обозначены факторы, влияющие на величину коэффициента теплоотдачи, представлены расчетные и экспериментальные зависимости. Показано, что интенсификация теплообмена наблюдается при ламинарном режиме течения наножидкости и определяется значением коэффициента теплопроводности суспензии. Результаты исследования демонстрируют перспективность применения наножидкостей для интенсификации теплообмена и повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок, в том числе в качестве теплоносителя в жаротрубных водогрейных котлах.

**Ключевые слова:** наножидкости, теплоотдача, диоксид кремния, теплоноситель, экспериментальная установка.

Ekaterina N. Slobodina, Alexander M. Paramonov, Ivan A. Stepashkin, Andrey G. Mikhailov

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL INVESTIGATIONS OF HEAT EXCHANGE PROCESSES USING NANOFLUIDS

**Abstract.** Traditional heat carriers have certain limitations in application due to their relatively low thermophysical properties. The addition of nanoscale particles to the base liquid causes an improvement in these properties of heat carriers and is an impetus for the development of research on the properties of next-generation heat carriers - nanofluids. The article discusses methods for producing nanofluids – a single-stage method, which consists in the simultaneous synthesis and dispersion of nanoparticles in a base liquid, and a two-stage method based on the separate synthesis and dispersion of nanoparticles in a base liquid. In the studies considered, a two-stage method for obtaining nanofluids was used. This article discusses the advantages of using nanofluids as a coolant in comparison with a traditional coolant – water. Special attention is paid to nanofluids based on silicon dioxide  $\text{SiO}_2$ . The paper presents the results of an experimental study of heat transfer during the flow of a nanofluid based on silicon dioxide  $\text{SiO}_2$  and water in the laminar regime. The article examines the effect of the concentration of silicon dioxide  $\text{SiO}_2$  nanoparticles on the thermal conductivity and viscosity of the resulting nanofluid. The scheme of the installation for the experimental study of heat transfer processes during the flow of nanofluids is presented. The principle of operation and the main elements of the experimental setup are described. It is shown that an increase in the concentration of nanoparticles leads to an increase in the heat transfer coefficient within 30% compared with a traditional coolant – water. The article identifies the factors influencing the value of the heat transfer coefficient, presents the calculated and experimental dependences. It is shown that the intensification of heat transfer is observed in the laminar flow regime of the nanofluid and is determined by the value of the thermal conductivity coefficient of the suspension. The results of the study demonstrate the prospects of using nanofluids to intensify heat transfer and increase the energy efficiency of thermal power plants, including as a coolant in heat-tube hot water boilers.

**Keywords:** nanofluids, heat transfer, silicon dioxide, coolant, experimental installation.

Изучение механизмов теплопереноса в жидкостях привлекает все большее внимание с тех пор, как диспергирование наноразмерных частиц в жидкость была впервые представлена как концепция во второй половине двадцатого века. Растущий интерес к наножидкостям обусловлен прежде всего их улучшенными теплофизическими свойствами и способностью к интеграции в различные тепловые процессы, начиная от повышения эффективности теплообменников, котлов в промышленности и заканчивая использованием солнечной энергии для производства возобновляемой энергии.

Традиционные теплоносители, такие как вода, термальные масла и этиленгликоль вода, обладают определенными ограничениями в применении из-за их лимитированных теплофизических свойств по сравнению с твердыми веществами. Улучшение теплофизических свойств этих жидкостей путем добавления наноразмерных частиц привело к эволюции в исследовании теплоносителей. Введение твердых частиц в базовую жидкость приводит к повышению коэффициента теплопроводности и к интенсификации теплообмена.

Наножидкости – это коллоидные суспензии, формируемые с использованием базовой жидкости и наночастиц, характерные размеры последних находятся в диапазоне от 10 до 100 нм. В качестве материалов для наночастиц используются чистые металлы, соединения последних с кислородом, а также химические элементы или химические соединения. Наночастицы проявляют стабильность при диспергировании в жидкостях и, как правило, улучшают теплофизические свойства жидкости [1, 2].

На рисунке 1 представлены фотографии наночастиц диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , полученные авторами исследования с применением электронного микроскопа JEOL JCM-5700 в научно-образовательном ресурсном центре нанотехнологий «Наноцентр» ОмГТУ.

**Теплопроводность наножидкостей.** На основании результатов ранних экспериментальных исследований зарубежных и отечественных авторов [1 – 9] по определению коэффициентов переноса в наножидкостях показано, что при увеличении концентрации наночастиц в базовой жидкости (дистиллированной воде) отмечается

увеличение коэффициента теплопроводности суспензии. Отмечается также, что коэффициент теплопроводности зависит от концентрации (формула Максвелла) [3]:

$$\lambda = \lambda_0 \left[ 1 + \frac{3(1 - \varpi) \varphi}{1 + 2\varpi - \varphi(1 - \varpi)} \right], \quad (1)$$

где,  $\varpi = \lambda_0/\lambda_p$ ,  $\lambda_0$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности базовой жидкости и материала частиц соответственно;  $\varphi$  – концентрация наночастиц.

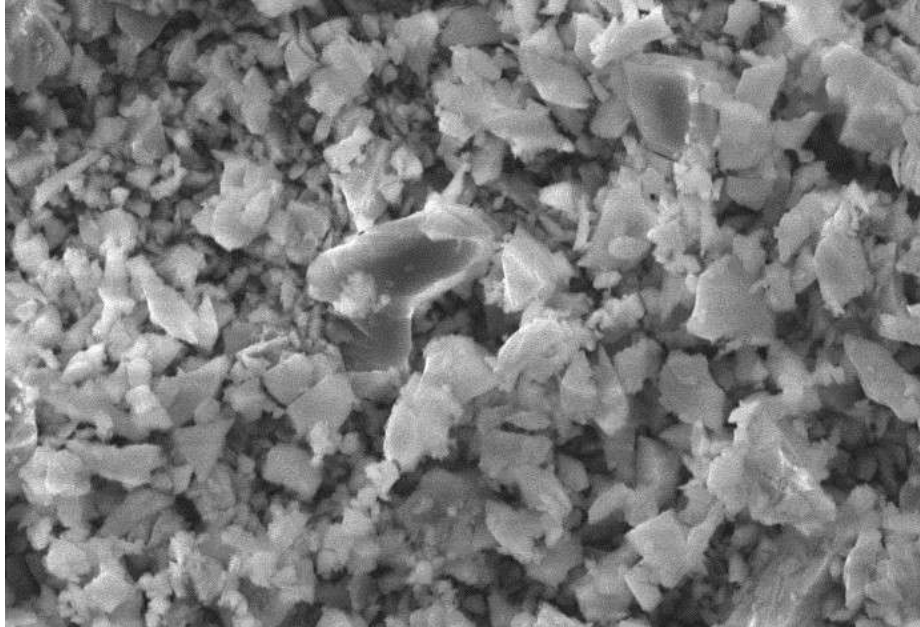


Рисунок 1 – Образцы наночастиц диоксида кремния

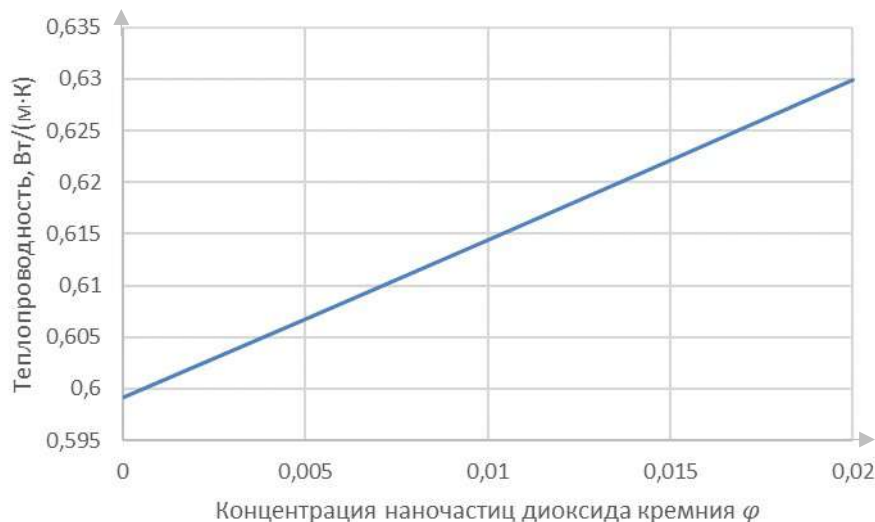


Рисунок 2 – Расчетная зависимость коэффициента теплопроводности от концентрации наночастиц диоксида кремния (формула Максвелла)

С ростом концентрации наночастиц  $\varphi$  коэффициент теплопроводности  $\lambda$  суспензии растет в соответствии с формулой (1).

**Вязкость наножидкостей.** Применение наножидкостей связано с режимом течения, а вязкость суспензии имеет первостепенную значимость в контексте применения наножидкостей.

А. Эйнштейн установил взаимосвязь величины объемной концентрации наночастиц и коэффициента динамической вязкости [3, 4]:

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5\varphi), \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости базовой жидкости.

Формула (2) описывает коэффициент динамической вязкости  $\mu$  модифицированного теплоносителя при  $\varphi$  в пределах 1 %. При более высоких значениях  $\varphi$  для анализа коэффициента динамической вязкости  $\mu$  результат можно представить в виде [3, 4]:

$$\mu = \mu_0(1 + a\varphi + b\varphi^2). \quad (3)$$

Коэффициенты  $a = 2,5$ ,  $b$  изменяется в интервале от 4,3 до 7,6.

В формуле (3) коэффициент  $a$  изменяется в диапазоне от 4,5 до 20, коэффициент  $b$  изменчив, но всегда заметно превышает значения, предсказанные традиционными теоретическими моделями. Такое поведение может быть связано с рядом факторов, включая размер и материал наночастиц.

На рисунке 3 представлена графическая зависимость коэффициента динамической вязкости  $\mu$  наножидкости от объемной концентрации наночастиц  $\varphi$  ( $\text{SiO}_2$ ).

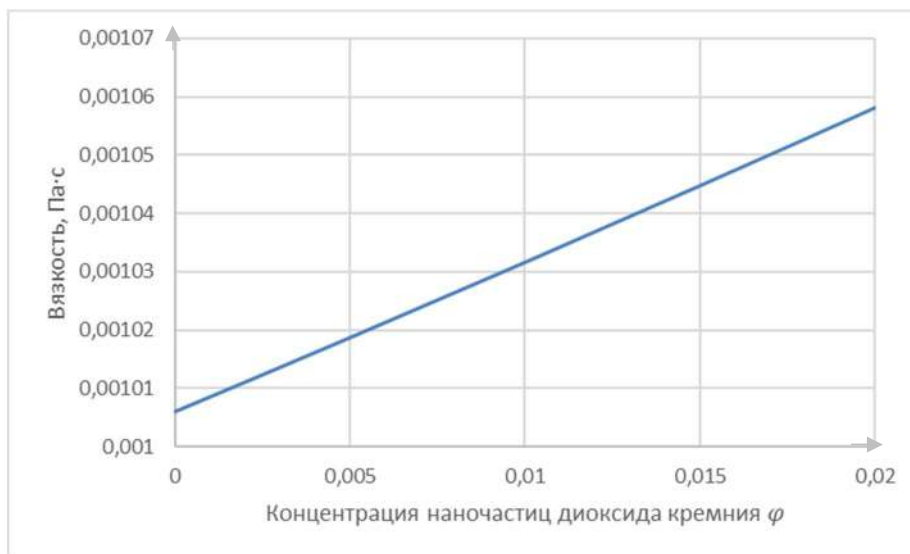


Рисунок 3 – Расчетная зависимость динамической вязкости наножидкости от концентрации наночастиц диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  (формула А. Эйнштейна)

С увеличением концентрации наночастиц  $\varphi$  в наножидкости наблюдается увеличение значений коэффициента динамической вязкости  $\mu$ . Из формулы (3) следует, что при 2 % объемной концентрации наночастиц возрастает коэффициент динамической вязкости суспензии  $\mu$  до 5 %.

Расчет коэффициента теплоотдачи. В связи со значительными отличиями для величины вязкости модифицированных теплоносителей, течения базовой жидкости и наножидкости при одинаковых расходах значения чисел Рейнольдса различны. Расчетное исследование взаимосвязи между коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  и числом Рейнольдса  $Re$  (рисунок 4) показывает, что интенсификация теплообмена при применении наножидкостей оказывается весьма существенной. Эффект зависит как от теплопроводности наножидкости, так и от ее вязкости. Качественно этот эффект можно понять, используя формулу для числа Нуссельта [3]:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}, \quad (4)$$

где  $Pr$ ,  $Re$  – число Прандтля и число Рейнольдса соответственно.

При стационарном ламинарном режиме течения модифицированного теплоносителя коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности  $\lambda$  наножидкости. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  модифицированного теплоносителя возрастает вследствие присутствия в нем наночастиц. В ламинарном режиме течения теплообмен интенсифицируется независимо от изменений коэффициента динамической вязкости  $\mu$ .

При фиксированном расходе число Нуссельта при турбулентном течении теплоносителя пропорционально комплексу [3]

$$Nu \sim \lambda^{0,57} / \mu^{0,37}. \quad (5)$$

Расчетные данные по определению коэффициента  $\alpha$  при течении наножидкости на основе дистиллированной воды с добавлением наночастиц  $SiO_2$  представлены на рисунке 4. Полученные данные свидетельствуют о существенном увеличении коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при добавлении наночастиц в базовую жидкость.

Подобные закономерности отмечаются и для других наножидкостей, однако этот эффект уменьшается по мере снижения концентрации наночастиц [4].

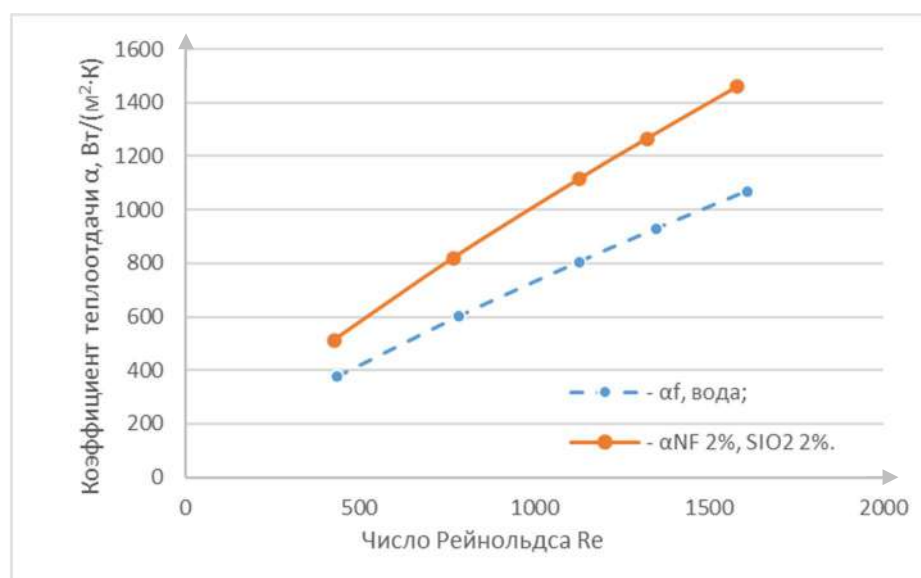


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от числа Re (результаты расчетных исследований):  $\alpha_f$  – коэффициент теплоотдачи воды;  $\alpha_{NF}$  – коэффициент теплоотдачи наножидкости на основе частиц диоксида кремния  $SiO_2$

С использованием математической аппроксимации можно отметить, что с увеличением числа Рейнольдса Re происходит увеличение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  как для воды, так и для наножидкости при концентрации наночастиц диоксида кремния  $\varphi = 2\%$  при ламинарном течении теплоносителя. Превышение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  наножидкости находится в пределах 40% по сравнению с базовой жидкостью – водой – при числе Рейнольдса  $Re = 1500$ .

Экспериментальные исследования по изучению процессов теплообмена при течении наножидкостей проводятся на базе кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ. Основная цель этих исследований заключается в разработке модифицированных теплоносителей, которые должны применяться в теплоэнергетических установках.

Для подготовки наножидкости в экспериментах был использован двухстадийный метод, включающий в себя использование в качестве частиц  $SiO_2$  (диоксида кремния). Двухстадийный метод широко используется при приготовлении наножидкостей. В этом методе промышленные или лабораторно синтезированные наночастицы диспергируются в базовых жидкостях с помощью перемешивания или ультразвуковой обработки. Процесс двухстадийной методики подготовки наножидкости проиллюстрирован на рисунке 5.

Метод, используемый при получении наножидкостей, важен для формирования стабильности и теплофизических свойств наножидкостей.

Для эксперимента использовались диспергированные в базовой жидкости наночастицы  $\text{SiO}_2$ . В качестве базовой жидкости применялась дистиллированная вода. При анализе экспериментальных данных погрешности прямых измерений определялись характеристиками контрольно-измерительных приборов и не превышали 3 %.



Рисунок 5 – Двухстадийный метод подготовки наножидкости

Установка для экспериментального изучения теплоотдачи при течении наножидкости представлена на рисунке 6. Экспериментальный стенд состоит из замкнутого контура с движущейся внутри исследуемой жидкостью. Последняя перемещается через контрольный обогреваемый участок, который представляет собой трубку с внутренним диаметром 11 мм и длиной 300 мм. Повышение температуры наножидкости обеспечивается за счет контакта через стенку с горячим теплоносителем ГВ. Для точного измерения температуры теплоносителя установлены термомпары, в том числе и на входе и выходе из контрольного обогреваемого участка [5 – 8].

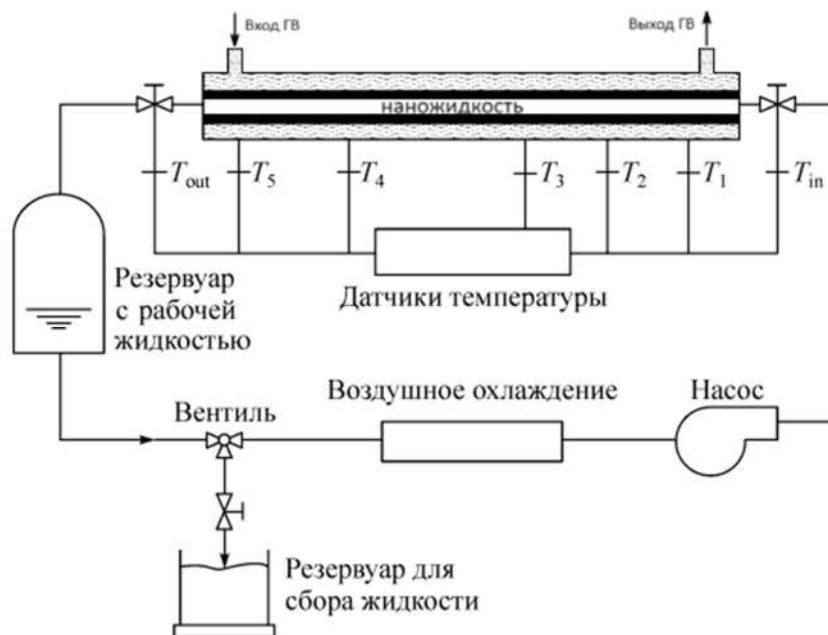


Рисунок 6 – Экспериментальная установка для изучения процессов теплопереноса при ламинарном течении теплоносителя

На рисунке 7 представлены результаты экспериментального исследования, в котором зафиксировано увеличение значения коэффициента теплоотдачи для наножидкости при концентрации частиц 2 % по сравнению с дистиллированной водой. Данная зависимость показана на рисунке 7.

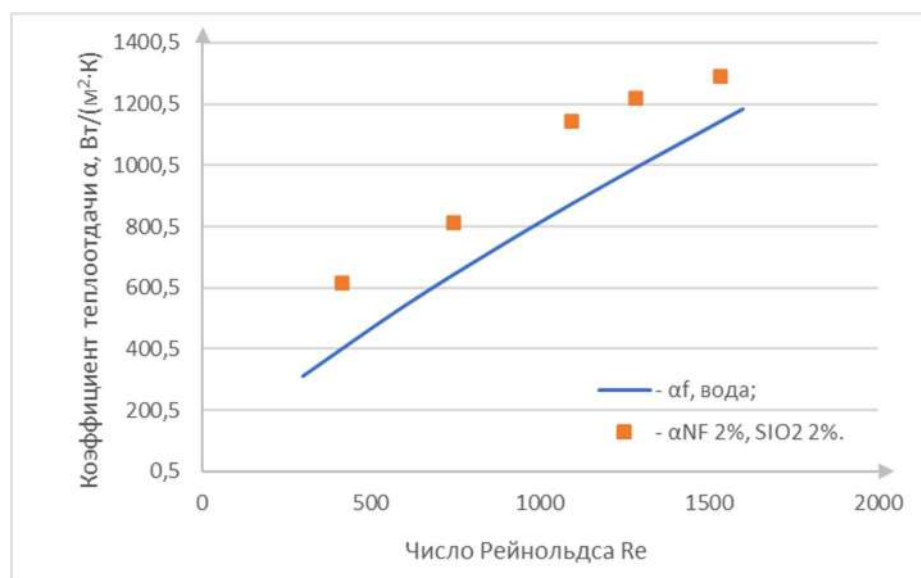


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от числа Re (результаты экспериментальных исследований):  $\alpha_f$  – коэффициент теплоотдачи воды;  $\alpha_{NF}$  – коэффициент теплоотдачи наножидкости на основе частиц диоксида кремния  $SiO_2$

На основе результатов экспериментальных исследований можно утверждать, что добавление наночастиц диоксида кремния  $SiO_2$  в базовую жидкость интенсифицируют теплообмен при ламинарном течении теплоносителя. Превышение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  наножидкости находится в пределах 30 % по сравнению с базовой жидкостью – водой – при числе Рейнольдса  $Re = 1100$ .

Полученные результаты доказывают перспективность применения наножидкостей в теплообменных системах при ламинарном режиме течения. При этом отмечено увеличение коэффициента теплоотдачи при повышении коэффициента теплопроводности наножидкости.

Результаты исследования, отраженные в данной статье, показывают, что добавление наночастиц диоксида кремния  $SiO_2$  в дистиллированную воду позволяет интенсифицировать теплообмен при ламинарном течении теплоносителя. Рост коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  прежде всего зависит от объемной концентрации наночастиц  $\phi$ , скорости потока  $u$  и теплопроводности суспензии  $\lambda$  [9].

Выявлено при эксперименте, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  наножидкости при концентрации наночастиц диоксида кремния 2 % максимально увеличивается до 30 % в диапазоне чисел Re от 400 – 1600 по сравнению с дистиллированной водой.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок при использовании в качестве теплоносителя наножидкостей.

## Список литературы

1. Okonkwo E.C., Wole-Osho I., Almanassra I.W. et al. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. *J Thermal Calorim* 145, 2817–2872 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09760-2>.
2. Расчетные исследования теплоотдачи при течении наножидкостей / Е. Н. Слободина, И. А. Степашкин, Д. В. Коваленко [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный

вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2023. – Т. 7. – № 3. – С. 46–52.

3. Рудяк, В. Я. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей / В. Я. Рудяк, А. В. Минаков, С. Л. Краснолуцкий. – Текст : непосредственный // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 75–83.

4. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди в цилиндрическом канале / А. В. Минаков, В. Я. Рудяк, Д. В. Гузей [и др.]. – Текст: непосредственный // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53. – № 2. – С. 256–263. – DOI: 10.7868/S0040364415020167. – EDN: TLOTOH.

5. Slobodina E.N., Mikhailov A.G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1652, 012037, pp. 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.

6. Awais M., Bhuiyan A.A., Salehin S. [et al.]. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview. *International Journal of Thermofluids*. 2021, vol. 10 (4), DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100086.

7. Hadad K., Rahimian A., Nemaollahi M.R. Numerical study of single and two-phase models of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, vol. 60, pp. 287-294, DOI: 10.1016/j.anucene.2013.05.017.

8. Yu W., France D.M., Timofeeva E.V. [et al.]. Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96 (21), 213109, pp. 1-3, DOI: 10.1063/1.3435487.

9. Haghghi E.B., Utomo A.T., Ghanbarpour M. [et al.]. Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparring Their Performace. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, vol. 57, pp. 378–387, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019.

## References

1. Okonkwo E.C., Wole-Osho I., Almanassra I.W. et al. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. *J Thermanal Calorim* 145, 2817–2872 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09760-2>.

2. Slobodina E.N., Stepashkin I.A., Kovalenko D.V., Mikhailov A.G., Rogachev E.A. Calculation studies of heat output in the flow of nanoliquids. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriiia aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie – Omsk scientific bulletin. Series aviation-rocket and power engineering*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 46-52 (In Russian).

3. Rudyak V.Ya., Minakov A.V., Krasnolutskii S.L. Physics and Mechanics of Heat Exchange Processes in Nanofluid Flows. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 75-83 (In Russian).

4. Minakov A.V., Guzei D.V., Lobasov A.S., Rudyak V.Y. Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid based on water and copper oxide particles in a cylindrical channel. *Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of High Temperatures*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 256-263, DOI: 10.7868/S0040364415020167, EDN: TLOTOH.

5. Slobodina E.N., Mikhailov A.G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1652, 012037, pp. 1-4, DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.

6. Awais M., Bhuiyan A.A., Salehin S. [et al.]. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview. *International Journal of Thermofluids*. 2021, vol. 10 (4), DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100086.

7. Hadad K., Rahimian A., Nemaollahi M.R. Numerical study of single and two-phase models of water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, vol. 60, pp. 287-294, DOI: 10.1016/j.anucene.2013.05.017.

8. Yu W., France D.M., Timofeeva E.V. [et al.]. Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96 (21), 213109, pp. 1-3, DOI: 10.1063/1.3435487.

9. Haghghi E.B., Utomo A.T., Ghanbarpour M. [et al.]. Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparing Their Performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, vol. 57, pp. 378–387, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Слободина Екатерина Николаевна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina\_e@mail.ru

### Парамонов Александр Михайлович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Тел.: +7 (913) 975-55-86.

E-mail: amparamonov@mail.ru

### Степашкин Иван Александрович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (902) 821-37-40.

E-mail: saundersivan7@gmail.com

### Михайлов Андрей Гаррьевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», ОмГТУ.

Тел.: +7 (905) 923-96-46.

E-mail: mikhailovand@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при использовании наножидкостей / Е. Н. Слободина, А. М. Парамонов, И. А. Степашкин, А. Г. Михайлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 100 – 108.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Slobodina Ekaterina Nikolaevna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Phone: +7 (913) 647-39-71.

E-mail: slobodina\_e@mail.ru

### Paramonov Alexander Mikhailovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Professor of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Тел.: +7 (913) 975-55-86.

E-mail: amparamonov@mail.ru

### Stepashkin Ivan Alexandrovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Тел.: +7 (902) 821-37-40.

E-mail: saundersivan7@gmail.com

### Mikhailov Andrey Garrievich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Heat power engineering», OmSTU.

Тел.: +7 (905) 923-96-46.

E-mail: mikhailovand@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Slobodina E.N., Paramonov A.M., Stepashkin I.A., Mikhailov A.G. Experimental and computational investigations of heat exchange processes using nanofluids. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 100-108 (In Russian).

**А. П. Полозкова, В. К. Гаак, А. С. Гусаров**

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

## **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

**Аннотация.** Запасы ископаемого топлива конечны и постоянно уменьшаются, при этом потребление энергии растет. Помимо этого во многих населенных пунктах существуют проблемы с теплоснабжением, а в некоторых отдаленных и труднодоступных районах отсутствует устойчивое энергоснабжение. Кроме ТЭЦ существуют гораздо более экологически чистые источники энергии или альтернативные источники энергии. Основным препятствием распространения гелиотеплоснабжения в Сибири является высокая стоимость вакуумных коллекторов и снижение КПД плоских гелиоколлекторов с уменьшением температуры наружного воздуха. Анализ различных моделей плоских солнечных коллекторов и опыта их применения показал, что большинство из них малоэффективны в регионах с холодным климатом. При этом солнечная активность в большей части данных регионов имеет высокий уровень. В статье анализируются возможности повышения эффективности работы солнечных коллекторов. Для проведения оценки эффективности работы и улучшения конструкции солнечных водяных коллекторов выявлены факторы, влияющие на тепловые характеристики тепловых систем, использующих солнечные водяные коллекторы. Степень эффективности процесса передачи теплоты теплоносителя оценивается коэффициентом отвода теплоты или фактором отвода теплоты, другим не менее важным фактором является фактор эффективности коллектора, который представляет собой отношение фактического полезного прироста энергии к полезному приросту. В статье установлены их физический смысл, взаимосвязь друг с другом и связь с термодинамическими характеристиками системы, использующей водяные солнечные коллекторы. В статье приведены уточненные формулы для расчета коэффициентов теплопередачи, полученные на основе результатов современных исследований в области теплообмена плоских поверхностей и окружающей среды. Представлена также формула для расчета КПД солнечного водяного коллектора во взаимосвязи с термодинамическими характеристиками системы с водяными солнечными коллекторами и факторами отвода теплоты и эффективности коллектора.

**Ключевые слова:** солнечный коллектор, альтернативная энергетика, энергопотребление, тепловая изоляция, фактор отвода теплоты, фактор эффективности коллектора.

**Anastasia P. Polozkova, Viktor K. Gaak, Artem S. Gusarov**

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

## **ON THE ISSUE OF DETERMINING THE THERMAL EFFICIENCY OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS**

**Abstract.** Fossil fuel reserves are finite and constantly decreasing, while energy consumption is growing. In addition, many settlements have problems with heat supply, and in some remote and hard-to-reach areas there is no stable energy supply. In addition to thermal power plants, there are much more environmentally friendly energy sources or alternative energy sources. The main obstacle to the spread of solar heat supply in Siberia is the high cost of vacuum collectors and the decrease in the efficiency of flat solar collectors with a decrease in outside air temperature. Analysis of various models of flat solar collectors and experience with their use have shown that most of them are ineffective in regions with a cold climate. At the same time, solar activity in most of these regions is high. The article analyzes the possibilities of improving the efficiency of solar collectors. To assess the efficiency of operation and improve the design of solar water collectors identified factors affecting the thermal characteristics of thermal systems using solar water collectors. The degree of efficiency of the heat transfer process of the heat carrier is estimated by the heat removal factor or heat removal factor, another equally important factor is the collector efficiency factor, which is the ratio of the actual useful energy gain to the useful energy gain. The article establishes their physical meaning, their relationship with each other and their relation to the thermodynamic characteristics of a system utilizing water solar collectors. The article also provides refined formulas for calculating heat transfer coefficients based on modern research in the field of heat and mass transfer of flat surfaces and the environment. The paper concludes with a formula for calculating the efficiency of a solar water collector in relation to the thermodynamic characteristics of the system with solar water collectors and the factors of heat dissipation and collector efficiency.

**Keywords:** solar collector, alternative energy, energy consumption, thermal insulation, heat removal factor, collector efficiency factor.

Использование водяных солнечных коллекторов (ВСК) в быту и промышленности резко возросло благодаря значительному прогрессу, подкрепленному различными инновациями, повышающими эффективность их работы. Исследование [1] показало, как повышение эффективности технологии ВСК способствовало их широкому внедрению в различных секторах. К основным разработкам относятся внедрение новых материалов для коллекторов, интеграция систем в существующие здания, исследования инновационных методов аккумуляции и распределения тепла, применение передовых систем управления [2]. Несмотря на некоторые проблемы, такие как высокая первоначальная стоимость и недоверие общественности [3], интерес к ВСК с каждым годом растет благодаря их значительным преимуществам [4, 5].

В настоящее время ВСК чаще применяются в промышленности и коммерческих секторах, таких как гостиницы, рестораны и общественные государственные учреждения – больницы, общежития, где наблюдается высокая потребность в горячей воде. Для частных домовладений результаты исследований использования ВСК приведены в работе [6], где показана достаточная эффективность при условии проживания больших семейств – от четырех человек.

Существует два подхода к повышению эффективности работы систем с ВСК. Первый – это проектирование конструктивно новых ВСК или внесение улучшений в существующие системы, второй – это повышение производительности солнечного коллектора путем оптимизации рабочих параметров, таких как угол наклона коллектора, скорость потока рабочей жидкости и рабочая температура.

При оценке КПД ВСК требуется применять математическое моделирование и эмпирические данные, полученные в ходе реальных экспериментов [7].

Для проведения оценки эффективности работы и улучшения конструкции ВСК требуется определить факторы, влияющие на тепловые характеристики системы: поглощенная солнечная энергия, потери энергии, эффективность поглощения энергии рабочим телом солнечного коллектора и др. [5].

Эффективный тепловой поток, передаваемый теплоносителю, определяется его массовым расходом, умноженным на теплоемкость и разность температур [5], Вт:

$$Q_e = Gc_p(T_{T2} - T_{T1}), \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя через коллектор, кг/с;

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг · К);

$T_{T2}, T_{T1}$  – температура теплоносителя на выходе и на входе в коллектор, К.

Тепловые характеристики коллектора рассчитывают исходя из уравнения баланса энергии, которое позволяет определить долю энергии падающего излучения как полезную энергию, передаваемую теплоносителю с учетом тепловых потерь [5]:

$$\alpha_{пл} J_c \tau_c S_k = Q_{пл} + Q_{пот}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{пл}$  – поглощательная способность поверхности пластины солнечного коллектора;

$J_c$  – полная плотность потока солнечного излучения, падающего на поверхность коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_c$  – эффективная пропускная способность покрытия солнечного коллектора;

$S_k$  – площадь плоского коллектора, м<sup>2</sup>;

$Q_{пл}$  – тепловой поток, поглощенный пластиной коллектора и переданный к теплоносителю, Вт;

$Q_{пот}$  – тепловой поток (тепловые потери) от поглощающей пластины коллектора в окружающую среду, Вт.

Значение коэффициента полезного действия коллектора представляет собой отношение полезно используемой энергии к полной энергии падающего солнечного излучения на всю площадь коллектора [9]:

$$\eta = \frac{Q_e}{S_k J_c} \quad (3)$$

где  $Q_e$  – полезная используемая энергия, Вт;

$S_k$  – площадь плоского коллектора,  $m^2$ ;

$J_c$  – полная плотность потока солнечного излучения, падающего на поверхность коллектора,  $Вт/м^2$ .

Тепловые потери в солнечном коллекторе [8]

$$Q_{пот} = k_k S_k (T_{пл} - T_{воз}), \quad (4)$$

где  $k_k$  – коэффициент теплопередачи коллектора в окружающую среду, при двойном остеклении он составляет  $4 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$ , при одинарном –  $8 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$  [8];

$T_{пл}$  – средняя температура пластины коллектора, К;

$T_{воз}$  – температура окружающей среды, К.

Эффективность солнечного коллектора повышается с увеличением толщины соединительной пластины и ее теплопроводности и уменьшается с увеличением расстояния между трубами, по которым течет теплоноситель. Увеличение коэффициента теплопередачи от стенок канала трубок к рабочей жидкости приводит к возрастанию КПД коллектора, а увеличение тепловых потерь вызывает его снижение.

Степень эффективности процесса передачи теплоты теплоносителя оценивается *коэффициентом отвода теплоты*, или фактором отвода теплоты (heat removal factor)  $F_R$ , который характеризуется отношением фактического теплового потока, передаваемого теплоносителю, и теплового потока, передаваемого теплоносителю при максимальной разности температур между поглощающей пластиной и окружающей средой.

В источнике [9] приведена формула

$$F_R = \frac{G_c c_p (T_{T2} - T_{T1})}{\alpha_{пл} J_c \tau_c - k_k (T_{T1} - T_{воз})}, \quad (5)$$

где  $G_c = \frac{G}{S_k}$  – расход теплоносителя на единицу поверхности коллектора,  $кг/(m^2 \cdot c)$ ;

Формула вычисления коэффициента отвода теплоты  $F_R$  является не совсем очевидной с точки зрения уравнения баланса (2), поэтому для отражения физического смысла этого коэффициента представим его как отношение тепловых потоков:

$$F_R = \frac{Q_e}{Q_{пл}} \quad (6)$$

Далее преобразуем формулу (6), учитывая формулы (2) и (4):

$$\begin{aligned} F_R &= \frac{Q_e}{\alpha_{пл} J_c \tau_c S_k - Q_{пот}} = \frac{G_c c_p (T_{T2} - T_{T1})}{\alpha_{пл} J_c \tau_c S_k - k_k S_k (T_{пл} - T_{воз})} = \\ &= \frac{G_c c_p (T_{T2} - T_{T1})}{S_k (\alpha_{пл} J_c \tau_c - k_k (T_{пл} - T_{воз}))} = \frac{G_c c_p (T_{T2} - T_{T1})}{\alpha_{пл} J_c \tau_c - k_k (T_{пл} - T_{воз})}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результат выражения (7) теперь выглядит как формула для вычисления коэффициента отвода теплоты (5) за исключением того, что средняя температура пластины  $T_{пл}$  заменена на температуру теплоносителя на входе в коллектор  $T_{т1}$ . Физический смысл коэффициента отвода теплоты  $F_R$  – это отношение фактического теплового потока к максимально возможному, соответственно получим формулу:

$$F_R = \frac{Q_e}{Q_{пл}^{max}}, \quad (8)$$

где  $Q_{пл}^{max}$  – тепловой поток при максимальной разности температур между поглощающей пластиной и окружающей средой.

Максимально возможный тепловой поток в солнечном коллекторе будет в том случае, если весь коллектор будет находиться при температуре теплоносителя на входе  $T_{пл} = T_{т1}$ , потери тепла в окружающую среду при этом минимальны  $Q_{пот}^{min}$ .

Из уравнения баланса (2) и формулы (4), учитывая указанное выше, получим выражение:

$$Q_{пл}^{max} = \alpha_{пл} J_c \tau_c F_k - Q_{пот}^{min} = \alpha_{пл} J_c \tau_c F_k - k_k S_k (T_{т1} - T_{воз}). \quad (9)$$

Таким образом, формула вычисления коэффициента отвода теплоты (8) может быть использована в расчетах оптимальных термодинамических характеристик солнечного коллектора, связывает фактический полезный прирост энергии коллектора с таким полезным приростом энергии, если бы вся поверхность коллектора имела температуру теплоносителя на входе, т. е. можно рассчитать полезный прирост энергии как функцию температуры жидкости на входе в коллектор, которая обычно известна или измеряется датчиком. Фактическая температура пластины коллектора  $T_{пл}$  непостоянна и растет в направлении потока. При увеличении массового расхода теплоносителя через коллектор  $G$  средняя температура теплоносителя будет снижаться, и это будет приводить к снижению  $Q_{пот}$  в коллекторе, увеличивая полезный прирост тепловой энергии, т. е.  $F_R$  будет увеличиваться с ростом  $G$ .

В работе [10] приводится *коэффициент эффективности коллектора* как значимый коэффициент для оценки качества солнечных коллекторов, который зависит от расстояния между трубками, толщины пластины коллектора и связан с материалом, из которого изготавливаются элементы коллектора. Другое название этого коэффициента – фактор эффективности коллектора (collector efficiency factor)  $F'$ , который представляет собой отношение фактического полезного прироста энергии к полезному приросту, который был бы получен, если бы поглощающая поверхность коллектора находилась при температуре теплоносителя. Этот коэффициент будет равен отношению термического сопротивления теплопередаче от теплоносителя к окружающему воздуху  $R_{т-воз}$  к термическому сопротивлению теплопередаче от поглощающей пластины к окружающему воздуху  $R_{пл-воз}$ :

$$F' = \frac{R_{т-воз}}{R_{пл-воз}}. \quad (10)$$

Уточненные значения коэффициента  $F'$  приведены в работе [11] в зависимости от устройства трубок коллектора – параллельные, спиральные или змеевиковые.

Используя теоретические расчеты из работы [8] и формулы (5), (8) и (10), установим связь между  $F'$  и  $F_R$  следующим выражением:

$$F_R = \frac{G_c c_p}{k_k} \left[ 1 - \frac{\frac{\alpha_{пл} J_c \tau_c}{k_k} - (T_{т2} - T_{воз})}{\frac{\alpha_{пл} J_c \tau_c}{k_k} - (T_{т1} - T_{воз})} \right] = \frac{G_c c_p}{k_k} \left( 1 - e^{-\frac{k_k F'}{G_c c_p}} \right), \quad (11)$$

где  $G_c = \frac{G}{S_k}$  – расход теплоносителя на единицу поверхности коллектора, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$k_k$  – коэффициент теплопередачи от коллектора;

$T_{T1}$  – температура теплоносителя на входе, К;

$T_{T2}$  – температура теплоносителя на выходе, К;

$F'$  – коэффициентом эффективности коллектора;

$c_p$  – молярная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг · К).

Если увеличивать массовый расход теплоносителя через коллектор  $G$  до максимальных значений, температура теплоносителя на входе  $T_{T1}$  будет приближаться по величине к температуре теплоносителя на выходе  $T_{T2}$ , так как теплоноситель не будет успевать нагреваться теплом пластины. Температура поглощающей поверхности пластины  $T_{пл}$  все равно будет выше средней температуры теплоносителя  $T_T$ . Эта разница температур учитывается коэффициентом эффективности коллектора  $F'$ . Коэффициент  $F_R$  никогда не может превышать коэффициент  $F'$  [9].

Уравнение (2) можно представить в виде выражения, связывающего  $F_R$ , удельную поглощенную тепловую солнечную энергию  $q_{пог}$  и удельную энергию тепловых потерь  $q_{пот}$ :

$$Q_e = F_R S_k (q_{пог} - q_{пот}); \quad (12)$$

$$q_{пот} = k_k (T_{пл} - T_{воз}); \quad (13)$$

$$q_{пог} = \alpha_{пл} J_c \tau_c. \quad (14)$$

Коэффициент теплопередачи коллектора вычисляется по формуле:

$$k_k = k_{в. окр} + k_{в. из}, \quad (15)$$

где  $k_{в. окр}$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду от коллектора;

$k_{в. из}$  – коэффициент теплопередачи от коллектора к внутренней поверхности остекления за счет излучения.

Коэффициент теплопередачи в окружающую среду  $k_{в. окр}$ , вычисляется по формуле:

$$k_{в. окр} = \frac{1}{R_1 + R_2}. \quad (16)$$

Термическое сопротивление от остекления коллектора к окружающей среде  $R_1$ , вычисляется по формуле:

$$R_1 = \frac{1}{k_w + k_{изл, ост-окр}}. \quad (17)$$

Важно отметить, что на коэффициент теплопередачи влияют потери тепла, зависящие от скорости ветра. С помощью размерного соотношения, полученного [15], можно определить потери тепла [13], формулы справедливы для скорости ветра  $w \leq 5$  м/с:

$$k_w = 5,7 + 3,8w; \quad (18)$$

$$k_w = 2,8 + 3,0w, \quad (19)$$

где  $k_w$  – конвективный коэффициент теплопередачи с учетом влияния ветра, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Формулы (18) и (19) были получены при проведении эксперимента по обтеканию объектов в аэродинамической трубе, однако дальнейшие исследования показали, что

природный ветер более турбулентный по структуре потока. В более современном исследовании [15] приводится уточненная формула (20), согласуемая с исследованиями, результаты которых приведены в источнике [16], исследования были проведены на открытом воздухе ( $w \leq 1,12$  м/с):

$$k_w = (6,9 \pm 0,05) + (3,87 \pm 0,13)w. \quad (20)$$

Коэффициент теплопередачи, рассчитанный на основе лучистого теплообмена при температуре атмосферы ( $T_a$ ), может быть вычислен по уравнению:

$$k_{\text{изл, ост-окр}} = \varepsilon_{\text{ост}} \sigma (T_{\text{ост}}^4 - T_a^4). \quad (21)$$

В работе [17] для средних широт приводится соотношение для определения средне-статистической радиационной температуры атмосферы:

$$T_a = 0,0552 T_{\text{окр}}^{\frac{3}{2}}. \quad (22)$$

Теплопередача от коллектора к внутренней поверхности остекления происходит за счет свободной конвекции ( $k_{\text{к-ост}}$ ) и излучения ( $k_{\text{изл, к-ост}}$ ). Коэффициент термического сопротивления между коллектором и крышкой вычисляется по формуле:

$$R_2 = \frac{1}{k_{\text{к-ост}} + k_{\text{изл, к-ост}}}; \quad (23)$$

$$k_{\text{изл, к-ост}} = \frac{\sigma (T_{\text{к}}^4 - T_{\text{ост}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{пл}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ост}}} - 1}; \quad (24)$$

$$k_{\text{к-ост}} = \alpha (T_{\text{к}} - T_{\text{ост}}), \quad (25)$$

где  $k_{\text{к-ост}}$  – коэффициент теплопередачи между коллектором и остеклением коллектора, за счет конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$k_{\text{изл, к-ост}}$  – коэффициент теплопередачи между коллектором и остеклением коллектора за счет излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_{\text{к}}$  – температура коллектора, К;

$T_{\text{ост}}$  – температура стеклянной крышки коллектора, К;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\varepsilon_{\text{пл}}$  – степень черноты пластины коллектора;

$\varepsilon_{\text{ост}}$  – степень черноты стекла.

Коэффициент конвективного теплообмена от плоской поверхности по длине плоскости  $x$  определяется по выражению:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{x}, \quad (26)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена (коэффициент теплоотдачи), Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$Nu$  – число Нуссельта;

$\lambda$  – теплопроводность жидкости Вт/(м · К);

$x$  – длина плоскости, м.

Критерий подобия  $Nu$  отражает термическое сопротивление теплопроводности к термическому сопротивлению конвекции и определяется критериями подобия Прандтля  $Pr$  и Рэлея  $Ra$  для свободной конвекции. Уравнения для расчета  $Pr$  и  $Ra$  составляются по выражениям (28) и (29) соответственно:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}; \quad (27)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}; \quad (28)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} Pr, \quad (29)$$

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

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности жидкости, м<sup>2</sup>/с.

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\beta$  – коэффициент теплового расширения жидкости, К<sup>-1</sup>;

$\Delta T$  – разность температур между коллектором и крышкой, К;

$L$  – расстояние между коллектором и крышкой, м;

Согласно рекомендациям работы [18] теплопередача между двумя параллельными плоскостями, такими как пластина коллектора и остекление коллектора, представляет собой зависимость между  $Nu$  и  $Ra$ , которая может быть выражена уравнением:

$$Nu = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1780}{Ra \cos \beta}\right) \left(1 - \frac{1708(\sin 1,86 \beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta}\right) + \left(\frac{(Ra \cos \beta)^{\frac{1}{3}}}{5830}\right) - 1, \quad (30)$$

где  $\beta$  – угол наклона коллектора (от 0 до 75 °).

В работе [19] приводится эмпирическая формула, полученная в исследовании [20] для расчета общего коэффициента отдачи тепла от коллектора  $k_{в. окр}$ , который будет зависеть помимо указанных выше параметров и от расстояния между поглотителем и остеклением  $L$ , углом наклона коллектора  $\beta$ , количества стеклянных крышек  $N$ :

$$k_{в. окр} = \frac{1}{\frac{NT_{пл}}{C \left(\frac{T_{пл} - T_{воз}}{N + f}\right)^e} + \frac{1}{k_w}} + \frac{\sigma(T_{пл}^2 + T_{воз}^2)(T_{пл} + T_{воз})}{\frac{1}{d} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_{ост}} + g - N}, \quad (31)$$

где  $C, d, e, f, g$  – коэффициенты, приведенные в таблице [21].

Константы для уравнения (31)

Источник	$C$	$d$	$e$	$f$	$g$
Klein (1975)	$365,9 \cdot (1 - 0,00883 \cdot \beta + 0,0001298 \cdot \beta^2)$	$\varepsilon_{пл} + 0,05 \cdot N \cdot (1 - \varepsilon_{пл})$	0,33	$(1 - 0,04 \cdot k_w + 0,0005 \cdot k_w^2) \cdot \times (1 + 0,091 \cdot N)$	0
Klein (in Duffie and Beckman, 1980)	$520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot \beta^2)$ для $0^\circ < \beta < 70^\circ$ применять $\beta = 70^\circ$ для $\beta > 70^\circ$	$\varepsilon_{пл} + 0,00591 \cdot N \cdot k_w$	$0,43(1 - 100/T_{пл})$	$(1 + 0,089 k_w - 0,1166 k_w \cdot \varepsilon_{пл}) \times (1 + 0,07866 \cdot N)$	$0,133 \times \times \varepsilon_{пл} / \varepsilon_{ост}$
Agarwal and Larson (1981)	$250 \cdot (1 - 0,0044 \cdot \times (\beta - 90))$	$\varepsilon_{пл} + 0,0425 \cdot N \times (1 - \varepsilon_{пл})$	0,33	$(1 - 0,04 \cdot k_w + 0,0005 \cdot k_w)$	0
Melhotra et al. (1981)	$204,429 \cdot (\cos \beta)^{0,252} / L^{0,244}$	$\varepsilon_{пл} + 0,0425 \cdot N \times (1 - \varepsilon_{пл})$	0,252	$(9/k_w - 30/k_w^2) \cdot (T_a / 316,9) \times (1 + 0,091 N)$	0

Часть тепла передается от элементов коллектора к изоляции, расположенной в нижней части коллектора. Таким образом, коэффициент теплопотерь через изоляцию вычисляется с помощью уравнения:

$$k_{в. из} = \frac{1}{R_3} = \frac{\lambda}{\delta}, \quad (32)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность изоляции, Вт/(мК),

$\delta$  – толщина изоляционного слоя, м.

Сопоставив значения произведенной и потребленной энергии, определяют КПД коллектора:

$$\eta_k = \frac{Q_e}{S_k J_c}. \quad (33)$$

Полный КПД коллектора определяется путем умножения КПД коллектора на КПД рабочего тела:

$$\eta_t = \eta_k \cdot \eta_r. \quad (34)$$

Уравнения (1) – (33) согласуются с фундаментальными исследованиями в области теплопередачи [22].

Таким образом, верное определение параметров, влияющих на тепловую производительность водяного солнечного коллектора, очень важно, так как позволяет выявить проблемные области в оптимизации параметров работы системы с ВСК и несовершенства конструкции ВСК. Внедрение технологии применения ВСК в быту и промышленности с каждым годом получает более широкое распространение. Причиной роста внедрения этой технологии является интерес к возобновляемым источникам энергии из-за повышения цены топлива и тарифов на электроэнергию. Усиление внимания к технологии ВСК обусловлено мировым трендом на «зеленую энергетику», а также минимизацией выбросов вредных веществ от угольных и газовых топливных энергетических установок. Достаточная простота конструкции и относительная доступность потребителю делают ВСК перспективным источником тепловой энергии, соответственно результаты исследования, приведенные в статье по расчету КПД системы с учетом современных данных теплообмена и факторов эффективности ее работы, будут актуальны в ближайшем будущем.

## Список литературы

1. Weiss W., Spörk – Dür M. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2020. Detailed Market Figures 2019. 2021 edition. Available at: [www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf](http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf) (accessed 07.06.2024).
2. Финиченко, А. Ю. К вопросу управления системой теплоснабжения здания с солнечным коллектором с целью энергосбережения / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 6 (146). – С. 30-34.
3. Международное энергетическое агентство // сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.iea.org/> (дата обращения: 25.03.2024).
4. Afin Fadzlin, Md. Hasanuzzaman, Nasrudin Abd Rahim, Norridah Amin, Zafar Said. Global Challenges of Current Building-Integrated Solar Water Heating Technologies and Its Prospects: A Comprehensive Review. *Energies*, 2022, vol. 15, issue 14, pp. 1-42.
5. IRENA (2021), Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar Water Heaters. IRENA, Abu Dhabi.
6. Финиченко, А. Ю. Внедрение технических решений в гелиосистемы для эксплуатации в холодном климате / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 505–510.

7. Финиченко, А. Ю. Исследование работы гидравлической системы солнечного коллектора с обратным дренажем / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров // Известия Транссиба. – 2023. – № 4(56). – С. 82-90.
8. Овчинников, Ю. В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебное пособие / Ю. В. Овчинников, О. К. Григорьева, А. А. Францева. – Новосибирск : Новосибирский гос. техн. ун-т, 2015. – 258 с. – Текст : непосредственный.
9. Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd Edition, Wiley, Hoboken.
10. Eisenman W.K., Vajen and Ackermann H. On the Correlations Between Collector Efficiency Factor and Material Content of Parallel Flow Flat Plate Solar Collectors. *Solar Energy*, 2014, vol. 76, no. 3, pp. 381-387.
11. Malvi C.S., Arpit Gupta, Gau M.K., Crook R., Dixon-Hardy D.W. Experimental investigation of heat removal factor in solar flat plate collector for various flow configurations. *International Journal of Green Energy*, no. 14(4), 2017, DOI:10.1080/15435075.2016.1268619.
12. Torchia-Núñez, J. , Cervantes-de-Gortari, J. and Porta-Gándara, M. (2014) Thermodynamics of a Shallow Solar Still. *Energy and Power Engineering*, 6, 246-265. doi: 10.4236/epe.2014.69022.
13. Сергиевский, Э. Д. Расчет локальных параметров течения и теплообмена в каналах / Э. Д. Сергиевский, Н. В. Хомченко, Е. В. Овчинников. – Москва : МЭИ, 2001. – 60 с. – Текст : непосредственный.
14. Wattmuff, J.H., Charters, W.W.S., Proctor D. Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Internationale Revue d’Heliotechnique*, 1977, no. 2, pp. 56.
15. Suresh Kumar, S.C. Mullick. Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. *Solar Energy*, 2010, vol. 84, issue 6, pp. 956-963. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Delhi, Hauz Khas, New Delhi, India.
16. Sharples S., Charlesworth P.S. Full scale measurement of wind induced convective heat transfer from a roof mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, 1998, no. 62 (2), pp. 69-77.
17. Swinbank W.C. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1963, vol. 89, no. 381, pp. 339-348.
18. Hollands K.G.T., Unny T.E., Raithby G.D. and Konicek L. Free Convective Heat Transfer across Inclined Air Layers. *Journal of Heat Transfer*, 1976, no. 98, pp. 189-193.
19. Y. Raja Sekhar<sup>1</sup>, K.V. Sharma<sup>1</sup> and M. Basaveswara Rao. Evaluation of heat loss coefficients in solar flat plate collectors. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 15-19.
20. Hottel H.C., Woertz B.B. Performance of flat plate solar heat collectors. *Trans. of ASME*, 1942, no. 64, pp. 91-104.
21. Nitin Karwa, Rajendra Karwa. Calculation of top loss coefficient for a flat-plate solar collector with single glass cover. *Proc. National Conference on Emerging Energy Technologies at N.I.T.*, Hamirpur, India, March 28-29, 2003, pp. 69-75.
22. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Бастет, 2010. – 342 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Weiss W., Spörk – Dür M. Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2020. Detailed Market Figures 2019. 2021 edition. Available at: [www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf](http://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf) (accessed 07.06.2024).
2. Finichenko A.Yu., Polozkova A.P., Gusarov A.S. On the issue of managing the heat supply system of a building with a solar collector for the purpose of energy saving. *Énergobereženie i vodopodgotovka – Energy saving and water treatment*, 2023, no. 6 (146), pp. 30-34 (In Russian).
3. *Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo* [World Energy Outlook]. Available at: <https://www.iea.org/> (accessed 25.03.2024).

4. Afin Fadzlin, Md. Hasanuzzaman, Nasrudin Abd Rahim, Norridah Amin, Zafar Said. Global Challenges of Current Building-Integrated Solar Water Heating Technologies and Its Prospects: A Comprehensive Review. *Energies*, 2022, vol. 15, issue 14, pp. 1-42.
5. IRENA (2021), Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar Water Heaters. IRENA, Abu Dhabi.
6. Finichenko A.Y., Polozkova A.P. [Implementation of technical solutions in solar systems for operation in cold climates]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoi konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: proceedings of the scientific conference]. Omsk, 2023, pp. 505-510 (In Russian).
7. Finichenko A.Yu., Polozkova A.P., Gusarov A.S. Study of the operation of the hydraulic system of a solar collector with reverse drainage. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 82-90 (In Russian).
8. Ovchinnikov Yu.V., Grigor'eva O.K., Frantseva A.A. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiiakh: uchebnoe posobie* [Energy saving in thermal power engineering and thermal technologies: a textbook]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2015, 258 p. (In Russian).
9. Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd Edition, Wiley, Hoboken.
10. Eisenman W.K., Vajen and Ackermann H. On the Correlations Between Collector Efficiency Factor and Material Content of Parallel Flow Flat Plate Solar Collectors. *Solar Energy*, 2014, vol. 76, no. 3, pp. 381-387.
11. Malvi C.S., Arpit Gupta, Gau M.K., Crook R., Dixon-Hardy D.W. Experimental investigation of heat removal factor in solar flat plate collector for various flow configurations. *International Journal of Green Energy*, no. 14(4), 2017, DOI:10.1080/15435075.2016.1268619.
12. Torchia-Núñez, J., Cervantes-de-Gortari, J. and Porta-Gándara, M. (2014) Thermodynamics of a Shallow Solar Still. *Energy and Power Engineering*, 6, 246-265. doi: 10.4236/epe.2014.69022.
13. Sergievsky E.D., Khomchenko N.V., Ovchinnikov E.V. *Raschet lokal'nykh parametrov techeniia i teploobmena v kanalakh* [Calculation of local parameters of flow and heat transfer in channels]. Moscow, Moscow Energy Institute Publ., 2001, 60 p. (In Russian).
14. Wattmuff, J.H., Charters, W.W.S., Proctor D. Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Internationale Revue d'Helio-technique*, 1977, no. 2, pp. 56.
15. Suresh Kumar, S.C. Mullick. Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. *Solar Energy*, 2010, vol. 84, issue 6, pp. 956-963. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Delhi, Hauz Khas, New Delhi, India.
16. Sharples S., Charlesworth P.S. Full scale measurement of wind induced convective heat transfer from a roof mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*, 1998, no. 62 (2), pp. 69-77.
17. Swinbank W.C. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1963, vol. 89, no. 381, pp. 339-348.
18. Hollands K.G.T., Unny T.E., Raithby G.D. and Konicek L. Free Convective Heat Transfer across Inclined Air Layers. *Journal of Heat Transfer*, 1976, no. 98, pp. 189-193.
19. Y. Raja Sekhar<sup>1</sup>, K.V. Sharma<sup>1</sup> and M. Basaveswara Rao. Evaluation of heat loss coefficients in solar flat plate collectors. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 15-19.
20. Hottel H.C., Woertz B.B. Performance of flat plate solar heat collectors. *Trans. of ASME*, 1942, no. 64, pp. 91-104.
21. Nitin Karwa, Rajendra Karwa. Calculation of top loss coefficient for a flat-plate solar collector with single glass cover. *Proc. National Conference on Emerging Energy Technologies at N.I.T.*, Hamirpur, India, March 28-29, 2003, pp. 69-75.
22. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Bastet Publ., 2010, 342 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Полозкова Анастасия Петровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Магистрант кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

### Гаак Виктор Климентьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: gaakvk@gmail.ru

### Гусаров Артем Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: kafedrateplo@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Полозкова, А. П. К вопросу определения тепловой эффективности плоских солнечных коллекторов / А. П. Полозкова, В. К. Гаак, А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 109 – 119.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Polozkova Anastasia Petrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Master student of the department «Thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

### Gaak Viktor Klimentevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: gaakvk@gmail.ru

### Gusarov Artem Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Senior Lecturer of the department «Thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: kafedrateplo@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Polozkova A.P., Gaak V.K., Gusarov A.S. On the issue of determining the thermal efficiency of flat-plate solar collectors. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 109-119 (In Russian).

УДК 621.92

**Т. В. Мятеж, Ю. А. Секретарев, Б. Н. Мошкин, С. С. Донченко**

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация

## СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧЕТА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СОСТАВЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ МАКСИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ

**Аннотация.** Поскольку при оптимизации режимов работы ГЭС в составе ВХК необходимо учесть взаимопrotivоречивые требования его участников в сочетании с синергетическим подходом к решению поставленной задачи, учитывая принципы эмергентности, то можно говорить о ее многокритериальности. Поэтому в работе используется Парето-оптимальное множество для поиска компромиссного решения по определению режима сработки-заполнения водохранилища, которое бы обеспечило не только выдачу гарантированных мощностей ГЭС, но и удовлетворение требований всех участников водохозяйственного комплекса. В качестве критериев выступают экономический и экологический критерии. При этом учитываются взаимопrotivоречивые требования участников ВХК на основе заполнения матрицы противоречий. В общем случае множество формируется дефицитными условиями работы водохозяйственного

комплекса, т. е. зависит от ожидания дефицита стока, распределения его между компонентами комплекса и стоимости компенсирующих мероприятий, направленных на сохранение водного и материального баланса региона. Выявляется связь между параметрами водохранилища, распределением отдачи между параметрами комплекса, структурой установленных мощностей и производственными затратами ЭВХК. Авторами создана оптимизационная модель, которая позволяет на основе полученных компромиссных решений с использованием экономического и экологического критериев, что видно на примере Новосибирского ВХК, найти оптимальный режим по управлению емкостью водохранилища ГЭС и добиться улучшения экологических параметров, что улучшает условия для водного транспорта.

**Ключевые слова:** дефицит расхода воды, ГЭС, синергетическая стоимость гидроресурса, оптимизация функционирования гидроэлектростанций, матрица противоречий, Парето-оптимальное множество, предельная полезность, водохозяйственный комплекс.

**Tatiana V. Myatezh, Yuri A. Sekretarev, Boris N. Moshkin, Semen S. Donchenko**

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

## A SYNERGETIC MODEL FOR ACCOUNTING FOR ENVIRONMENTAL DAMAGE IN OPTIMIZING THE OPERATING MODES OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS AS PART OF A WATER MANAGEMENT COMPLEX BASED ON THE PROFIT MAXIMIZATION CRITERION

**Abstract.** Since when optimizing the operating modes of a hydroelectric power station as part of a water and chemical complex, it is necessary to take into account the mutually contradictory requirements of its participants in combination with a synergetic approach to solving the problem, taking into account the principles of emergence, we can talk about its multicriteria. Therefore, the work uses the Pareto-optimal set to find a compromise solution to determine the operation-filling regime of the reservoir, which would ensure not only the delivery of guaranteed hydroelectric power capacity, but also satisfaction of the requirements of all participants in the water management complex. The criteria are economic and environmental criteria. At the same time, the mutually contradictory requirements of the participants of the water and chemical complex are taken into account based on filling out the contradiction matrix. In the general case, set is formed by the scarce operating conditions of the water management complex, i.e., it depends on the expectation of a shortage of flow, its distribution between the components of the complex and the cost of compensating measures aimed at maintaining the water and material balance of the region. A connection is revealed between the parameters of the reservoir, the distribution of returns between the parameters of the complex, the structure of installed capacities and the production costs of the ECC. The authors have created an optimization model that allows, based on the obtained compromise solutions, using economic and environmental criteria, in the example of the Novosibirsk Water Chemical Complex, to find the optimal mode for managing the capacity of a hydroelectric reservoir and achieve improved environmental parameters, which improves conditions for water transport.

**Keywords:** deficit of water consumption, hydroelectric power station, synergetic cost of hydro resources, optimization of the functioning of hydroelectric power plants, matrix of contradictions, Pareto-optimal set, marginal utility, water-economic complex.

В последнее время существенно возросло негативное влияние на окружающую среду. Поэтому вопросу улучшения качества окружающей среды должно быть уделено немалое внимание при решении оптимизационных задач касательно технологических процессов.

Целью данной работы является создание новой методики оптимизации режимов работы водохозяйственного комплекса (ВХК) на базе оптимизации режимов работы гидроэлектростанций (ГЭС) в гидротепловой системе на основе теории предельной полезности путем определения стоимости гидроресурса с учетом не только режимных особенностей ГЭС, но и всех участников ВХК.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: выбраны критерии оптимизации режимов работы ВХК с учетом экологического ущерба, проведены патентно-ориентированный поиск и анализ методик по оптимизации режимов ВХК и методик по определению ущерба от негативного воздействия на водные объекты, разработана методика оценки экологического ущерба при оптимизации функционирования ВХК на основе Парето-оптимального множества, выполнена оценка условной нагрузки загрязняющими веществами в маловодный и многоводный годы, рассмотрено влияние перепадов в температурном режиме и уровней воды в верхнем и нижнем бьефах на условия для

нерестилища и численность рыб, а также воздействие антропогенной нагрузки со стороны судоходства на водные объекты, создана синергетическая модель оптимизации режимов работы ВХК на основе определения стоимости гидроресурса с учетом требований всех участников ВХК.

В современных рыночных условиях планирование и контроль режимов ГЭС имеют большое техническое и экономическое значение. При этом должна быть учтена экологическая составляющая оптимизационного процесса по управлению режимами функционирования ГЭС. ГЭС – объект, который носит межотраслевой характер, т. е. находится на стыке двух отраслей: энергетической и водохозяйственного комплекса. Это обстоятельство превносит определенные трудности в оптимизационный процесс, заключающиеся во взаимоотношениях интересов участников ВХК. Поэтому данная задача является многокритериальной и основывается на экономическом и экологическом критериях. Для ее решения авторами предложено создание синергетической оптимизационной модели по управлению режимами работы ГЭС с учетом требований участников водохозяйственного комплекса на основе определения стоимости гидроресурса [1]. В качестве методики решения многокритериальной задачи используется Парето-оптимальное множество.

Проводимое исследование является актуальным, поскольку выработка электроэнергии от ГЭС в Сибири достигает 53,7 % от общей доли генерации по данному региону [2].

Поскольку гидроэлектростанция является основой водохозяйственного комплекса, управление её режимами позволяет оптимизировать работу для всего комплекса, повышая его эколого-экономическую эффективность в современных условиях. Для современных систем водного хозяйства характерно объединение проблем в области обеспечения водой, качества водных ресурсов, сохранения и поддержания экосистем водных и околосредовых территорий, а также компенсации и предотвращения отрицательных воздействий воды [3, 4]. Задача обеспечения качественной водой остается одной из важнейших задач экономики, поэтому развитие теории и методов экологических водохозяйственных расчетов представляет собой актуальное направление научных исследований как для проектирования новых объектов водного хозяйства, включая их реконструкцию, так и для обоснования эффективных режимов эксплуатации водохозяйственных сооружений и гидроэлектростанций [5]. Учет экологического критерия при назначении режима использования воды для управления стоками определяется экологическими параметрами проекта водохозяйственной системы и установленными санитарными нормами и правилами управления водными ресурсами, включая диспетчерские графики. В качестве экономического критерия авторами предложено использование критерия максимизации прибыли, который наиболее полно отражает современную ситуацию в области энергетики. И оба эти аспекта (экологический и экономический) в значительной степени зависят от принятой системы ценности удовлетворения потребностей в воде для пользователей водных ресурсов согласно двум сценариям развития общества: оптимистического и пессимистического.

В статье рассматривается разработка синергетической модели для эффективной работы ГЭС в системе водохозяйственного комплекса при оптимизации режимов работы на основе комплексных критериев эколого-экономической эффективности [6]. На основе проведенного исследования в статье даны рекомендации для управления режимами работы всего ВХК г. Новосибирска.

**Оптимизация режимов работы водохозяйственного комплекса с учетом экологического критерия.** Поскольку при оптимизации режимов работы ГЭС в составе ВХК необходимо учесть взаимопротиворечивые требования его участников в сочетании с синергетическим подходом к решению поставленной задачи, учитывая принципы эмерджентности, можно говорить о ее многокритериальности.

Спецификой участников водохозяйственного комплекса являются взаимопротиворечивые требования к режиму функционирования водного объекта во времени, что находит свое отражение в матрице противоречий. Рассмотрим ее построение на примере г. Новосибирска

(таблица 1) [7]. Более того, при оптимизации режимов работы ВХК должны быть учтены такие критерии, как надежность, экономичность и экологичность. Для сопоставления и учета взаимовлияния всех отраслей ВХК и оптимизационных критериев с выявлением свойств эмерджентности была построена синергетическая модель для эффективного управления режимами всего ВХК с учетом их технологических особенностей (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Матрица противоречий интересов участников ВХК для Новосибирска

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Отрасль												
ГЭС	Однокритериальная задача. Критерий максимизации прибыли. Методики: теория предельной полезности, принцип равенства относительных приростов расхода топлива											
Судоходство	Сведение водного баланса	Многокритериальная задача. Критерии – максимизация прибыли взаимопrotivоречивых отраслей. Методики – ВЭР, Парето-оптимальное множество									Сведение водного баланса	
Рыбное хоз-во		Многокритериальная задача. прибыли взаимопrotivоречивых отраслей. Методики – ВЭР, Парето-оптимальное множество										
Орошение	Сведение водного баланса											
ЖКХ												
Промышленность												
Санитарные попуски												

Таким образом, оптимизация режимов работы ВХК проводится только для тех месяцев, в которых были выявлены противоречия между требованиями по расходу воды различных участников ВХК. Для того чтобы выявить эти противоречия, воспользуемся такими инструментами, как матрица противоречий и Парето-оптимальное множество. При этом учитываются водность года, а также уровни верхнего и нижнего бьефов.

Матрица противоречий, также известная как матрица противоречивости, является инструментом, который используется для анализа и разрешения противоречий между различными параметрами или критериями в определенной системе или процессе. Эта матрица помогает идентифицировать и оценивать взаимозависимости и противоречия между различными факторами, чтобы найти оптимальное решение или компромисс.

При решении поставленной задачи используется производственная функция – зависимость объема продукции от использования водных ресурсов. Как показал проведенный анализ, наибольшие противоречия были выявлены между такими отраслями, как гидроэнергетика, судоходство и рыбное хозяйство.

При управлении режимами ГЭС в составе ВХК необходимо учитывать такой параметр, как качество воды. Он описывается уравнением

$$G < \text{НДВ}, \quad (1)$$

где НДВ – нормы допустимых воздействий.

При создании новой модели оптимизации режимов работы ВХК необходимо проанализировать в деталях ранее созданные оптимизационные методики [13].

Многие авторы используют для оптимизации режимов ВХК метод циклограмм.

Другими авторами было предложено использование методов динамического программирования и дифференциальных выражений на основе уравнений Сан-Венана. Однако ввиду приближенного характера исходной информации по неэнергетическим участникам ВХК большинство авторов использовали линейную оптимизационную модель

вместо многомерной, что, несомненно, существенно упрощает ее решение, а также не позволяет реализовать принцип эмерджентности при управлении ВХК.

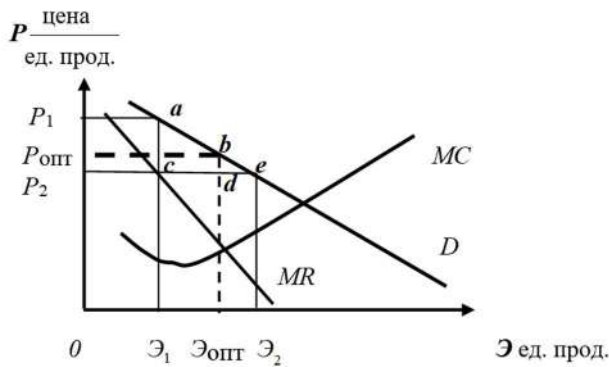


Рисунок 1 – Определение оптимального объема выпуска продукции:  $D$  – спрос на производимую энергию за определенный временной период;  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$  – оптимальная величина выработки за период;  $P_{\text{опт}}$  – цена продажи, соответствующая оптимальному объему производства;  $MR$  – предельный доход;  $MC$  – предельные издержки

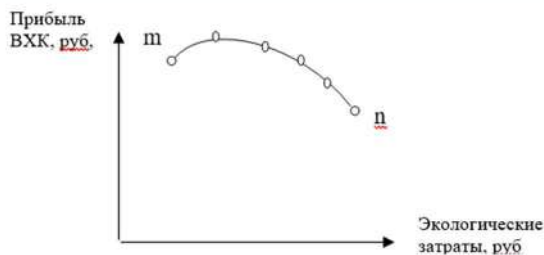


Рисунок 2 – Построение кривой Парето-эффективных решений для управления режимами функционирования ВХК

Учитывая все перечисленные выше недостатки, требуется создание принципиально новой многомерной математической модели по оптимизации режимов работы ВХК с учетом интересов всех его компонентов (рисунок 1).

Безусловно, в основу построения данной модели должен быть положен синергетический подход, который объединил бы надежностный, экономический и экологический критерии, тем более, что данная задача является многокритериальной.

Критерий максимизации прибыли отражает экономический критерий (см. рисунок 1). В основе данного критерия лежит критерий надежности.

По экологическому критерию рассчитываются затраты всего ВХК для компенсации вредного воздействия с его стороны на окружающую среду. На основе опроса мнений экспертов присваивается весовой коэффициент каждой составляющей затрат, после чего для каждого сценария развития учета экологического ущерба путем его вычитания из общего дохода для всего ВХК строится Парето-оптимальное множество (рисунок 2).

Промежуточные точки на рисунке 2 получаются с использованием метода взвешенных коэффициентов.

Оптимальное по Парето решение получают на основании выбора такого

промежуточного варианта, при котором оно не может быть улучшено по одному из критериев без его ухудшения по другому критерию [9].

Основываясь на изложенных выше тезисах, авторами была предложена следующая математическая модель.

1) Уравнения критериев:

а) Достаточное условие: принцип максимизации прибыли называется правилом равенства предельных издержек предельным доходам:

$$MR = MC - Y \rightarrow \max,$$

где  $MR$  – предельный доход, руб.;  $MC$  – предельные издержки, руб.;  $Y$  – экологический ущерб, руб.

$$MC = C_{\text{воды}} \cdot q; \quad (2)$$

$$C_{\text{воды}} = \text{tg } a \cdot \frac{U_b}{c_t}; \quad (3)$$

$$C_{\text{воды ВХК}} = C_{\text{воды ГЭС}} + \Delta C_{\text{воды } i\text{-й участник ВХК}}; \quad (4)$$

где  $q$  – относительный прирост расхода воды,  $\text{м}^3/\text{МВт}\cdot\text{с}$ ;  $C_{\text{воды}}$  – стоимость гидроресурса, руб./ $\text{м}^3$ ;  $c_t$  – цена топлива, руб./ т. у. т.;  $U_b$  – характеристика предельных издержек, руб./ $\text{МВт}\cdot\text{ч}$ .

Цена гидроресурса для  $i$ -го участника ВХК определяется аналогично стоимости гидроресурса для ГЭС на основе разработанной авторами методики, приведенной в источнике [9].

Определение предельного дохода ( $MR$ ):

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{суд } i} - Q_{\text{ГЭС } i} &= DQ_i [\text{м}^3/\text{с}]; \\
 DQ_i [\text{м}^3/\text{с}] \cdot c_{\text{воды}} &= DQ_i [\text{руб.}]; \\
 DQ_i [\text{руб.}] / DQ_{\text{max}} [\text{руб.}] &= DQ_i [\text{о. е.}]; \\
 MR &= 1 - DQ_i [\text{о. е.}]; \\
 MR [\text{руб.}] &= MR [\text{о. е.}] \cdot c_{\text{э/э}},
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $Q_{\text{суд } i}$  и  $Q_{\text{ГЭС } i}$  – расход воды судоходства и ГЭС соответственно за  $i$ -й период,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $DQ_i$  – дефицит расхода воды между двумя отраслями за  $i$ -й период;  $DQ_{\text{max}}$  – максимальный дефицит расхода воды между двумя отраслями за  $i$ -й период;  $c_{\text{воды}}$  – стоимость гидроресурса,  $\text{руб.}/\text{м}^3/\text{с}$ ,  $MR$  – предельный доход,  $\text{руб.}$ ,  $c_{\text{э/э}}$  – цена электроэнергии,  $\text{руб.}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ .

Для получения кривой предельных издержек всего водохозяйственного комплекса используют принцип равенства относительных приростов водных и топливных издержек. При этом поскольку наиболее критичными с точки зрения водопотребления являются такие отрасли, как ГЭС и судоходство, то в первую очередь необходимо определить характеристики относительных приростов расхода воды для ГЭС и судоходства, а также относительных приростов расхода топлива для судоходства. Далее полученные характеристики необходимо умножить на цену топлива для судоходства и стоимость гидроресурса для ГЭС, полученную на основе теории предельной полезности [6].

Для получения характеристики предельных издержек ВХК необходимо найти зависимость, обратную величине дефицита расхода воды в водохозяйственной системе за определенный сезон и путем отыскания разницы площадей под полученным графиком вычислить значения предельного дохода (рисунок 3).

По известной экономической зависимости на основе характеристики предельного дохода можно получить кривую спроса на воду в рамках водохозяйственного комплекса (рисунок 4).

Экологический ущерб от вредного взаимовлияния отраслей ВХК может быть выражен следующим образом:

$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5, \tag{6}$$

где  $Y_1$  – затраты на восстановление нарушенного состояния водных биоресурсов в рублях;  $Y_2$  – ущерб рыбному хозяйству, причиненный ухудшением условий воспроизводства;  $Y_3$  – затраты на дноуглубительные работы;  $Y_4$  – ущерб, нанесенный экосистеме водных объектов загрязняющими веществами;  $Y_5$  – ущерб от подтопления поймы территорий во время паводка.

б) Необходимое условие:

$$\sum_i^n |Q_{i\text{факт}} - Q_{i\text{опт}}| / Q_{i\text{факт}} \rightarrow \min, \tag{7}$$

где  $Q_{i\text{факт}}$  – фактический расход воды  $i$ -го участника ВХК,  $Q_{i\text{опт}}$  – оптимальный расход воды  $i$ -го участника ВХК.

2) Балансовое уравнение:

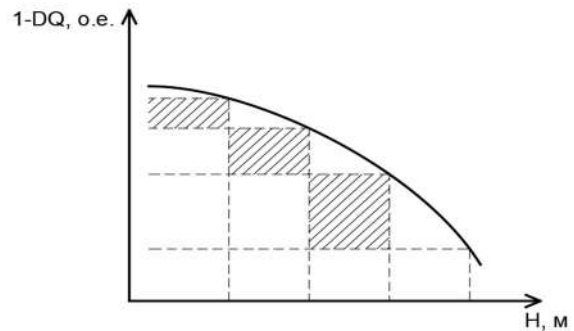


Рисунок 3 – Получение кривой предельного дохода для ВХК

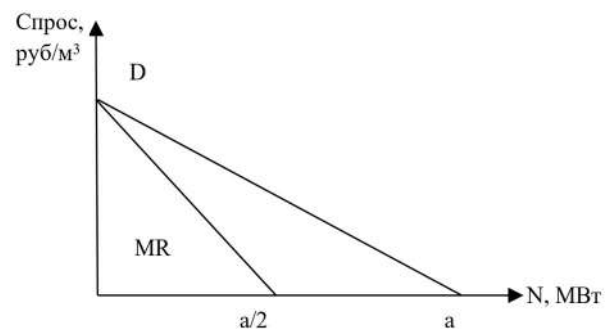


Рисунок 4 – Получение кривой спроса для ВХК

$$N_c^a = N_{\text{гар}}^a + N_{\text{ТЭС}}^a; \quad (8)$$

$$ВБ = W_{\text{вх}} + W_{\text{бок}} + W_{\text{пзв}} + W_{\text{в. в}} + W_{\text{дот}} \pm \Delta V \pm W_{\text{л}} - W_{\text{исп}} - W_{\text{ф}} - W_{\text{у}} - W_{\text{пер}} - W_{\text{вдп}} - W_{\text{кп}}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{вх}}$  – объем стока, поступающий за расчетный период с вышележащих участков рассматриваемого водного объекта, млн  $\text{м}^3$ ;  $W_{\text{бок}}$  – объем воды, формирующийся за расчетный период на расчетном водохозяйственном участке (боковая приточность);  $W_{\text{пзв}}$  – объем водозабора из подземных водных объектов, осуществляемых в порядке, установленном законодательством;  $W_{\text{в. в}}$  – возвратные воды на водохозяйственном участке: подземные и поверхностные воды, стекающие с орошаемых территорий, сточные и дренажные воды, отводимые в водные объекты;  $W_{\text{дот}}$  – дотационный объем воды, поступающий на водохозяйственный участок из систем территориального перераспределения стока;  $\Delta W$  – сработка или наполнение прудов и водохранилищ на расчетном водохозяйственном участке;  $W_{\text{исп}}$  – потери на дополнительное испарение с акватории водоемов;  $W_{\text{ф}}$  – фильтрационные потери водохранилищ, каналов, других поверхностных водных объектов в пределах расчетного водохозяйственного участка;  $W_{\text{у}}$  – уменьшение речного стока, вызванное водозабором из подземных водных объектов, имеющих гидравлическую связь с рекой;  $W_{\text{пер}}$  – переброска части стока за пределы расчетного водохозяйственного участка;  $W_{\text{вдп}}$  – суммарные требования всех водопользователей данного расчетного водохозяйственного участка;  $W_{\text{кп}}$  – требуемая величина стока в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка.

3) Уравнения ограничений:

$$Q_{\text{ГЭС}} \geq Q_{\text{гар}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{ГЭС}}$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $Q_{\text{гар}}$  – гарантированный расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Уравнения балансовых ограничений:

$$\begin{aligned} N_{\text{ТЭС min}} &\leq N_{\text{ТЭС}} \leq N_{\text{ТЭС max}}, \\ N_{\text{ГЭС min}} &\leq N_{\text{ГЭС}} \leq N_{\text{ГЭС max}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $N_{\text{ГЭС}}$  – мощность ГЭС;  $N_{\text{ТЭС}}$  – мощность ТЭС;  $N_{\text{min ГЭС}}$  – минимальная теоретическая мощность ГЭС;  $N_{\text{max ГЭС}}$  – максимальная теоретическая мощность ГЭС;  $N_{\text{min ТЭС}}$  – минимальная теоретическая мощность ТЭС;  $N_{\text{max ТЭС}}$  – максимальная теоретическая мощность ТЭС.

Такие же ограничения накладываются и на предельные издержки по топливу и воде.

$$N_{\text{набл}} = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L}, \quad (12)$$

где  $U_1$  – модуль напряжения в начале линии;  $U_2$  – модуль напряжения в конце линии;  $Z_c$  – волновое сопротивление линии;  $\alpha_0 L$  – волновая длина линии.

Ограничения по всем участникам ВХК:

промышленность и орошаемое земледелие: достаточные глубины над высотой водозабора:

$$z \geq z_{\text{min}}, \text{ м};$$

судоходство: достаточные судоходные глубины

$$h \geq h_{\text{min}}, \text{ м}; \quad (13)$$

рыбное хозяйство: достаточные глубины (особенно на период нереста рыб):

$$z \geq z_{\text{min}}, \text{ м}; \quad (14)$$

Для рыбного хозяйства значение имеют перепады температур.

4) Уравнение связи:

$$B = f(N_{\text{ТЭС}}), \quad Q_{\text{ГЭС}} = f(N_{\text{ГЭС}}, H_{\text{ГЭС}}), \quad (15)$$

где  $B$  – расход топлива (т. у. т. /ч);  $Q$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

5) Оптимизационное уравнение:

$$\frac{1-\sigma}{b} = \frac{1-\sigma}{q} \text{ при } U = \text{const}, \quad (16)$$

где  $U$  – кривая безразличия.

Рассмотрим построение модели на примере г. Новосибирска [7]. Для сопоставления и учета взаимовлияния всех отраслей ВХК и оптимизационных критериев с выявлением свойств эмерджентности была построена синергетическая модель для эффективного управления режимами всего ВХК с учетом их технологических особенностей (рисунок 5).

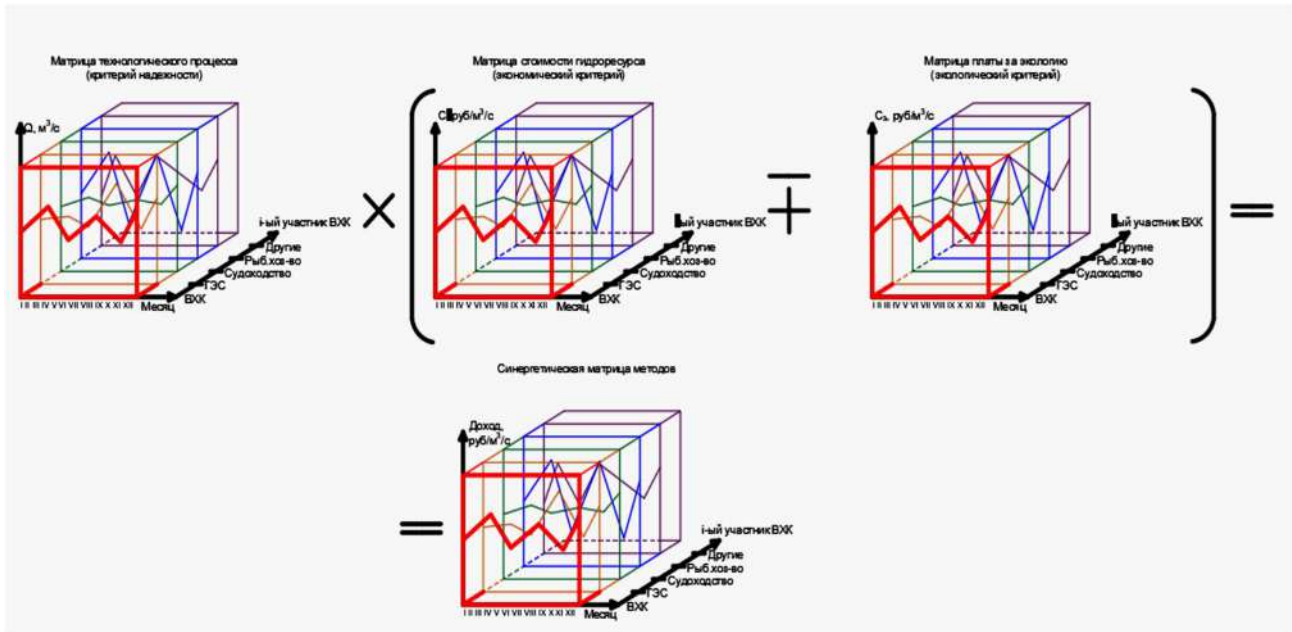


Рисунок 5 – Синергетическая матрица для оптимизации режимов работы ВХК

Как уже отмечалось, оптимизация режимов работы ВХК проводится только для тех месяцев, в которых были выявлены противоречия между требованиями по расходу воды различных участников ВХК. Итак, для того чтобы выявить эти противоречия, воспользуемся такими инструментами, как матрица противоречий и Парето-оптимальное множество. При этом учитывается водность года (в данной статье рассматривается маловодный год) и уровни верхнего и нижнего бьефов.

Матрица противоречий, также известная как матрица противоречивости, является инструментом, который используется для анализа и разрешения противоречий между различными параметрами или критериями в определенной системе или процессе. Эта матрица помогает идентифицировать и оценивать взаимозависимости и противоречия между различными факторами, чтобы найти оптимальное решение или компромисс [8].

Достигается это путем отыскания седловой точки синергетической матрицы (см. рисунок 5).

Остановимся более подробно на рассмотрении экологического ущерба Новосибирского ВХК.

Образование водохранилища НГЭС оказало немаловажное влияние на гидролого-гидрохимический режим верхнего бьефа ГЭС, а также обеспечило широкомасштабное использование стока реки Обь возникшим водохозяйственным комплексом и выполнение условий по неподтоплению территорий.

Как показывает анализ ранее проведенных исследований [21], емкость водохранилища имеет измененную береговую линию на протяжении 726 км. Процесс разрушения берегов продолжается, что особенно характерно для таких районов, как Сосновка, Красный Яр, Спирино, с. Антоново, с. Чингисы, с. Ленинское.

Процесс обрушения берегов на незащищенных участках продолжается, местами бровка берега приблизилась непосредственно к застройке населенных пунктов. В процессах разрушения берегов не наблюдается затухания, и площадь размыва зоны прибрежных земель возрастает. Отрицательное влияние процесса берегопереработки отражается в заиливании емкости водохранилища в результате того, что происходит смыл грунта [21].

В качестве меры борьбы с данным негативным явлением предлагается лесонасаждение вдоль берегов и метановое брожение для сбраживания избыточного активного ила.

На примере р. Обь в районе г. Новосибирск была определена стоимость дноуглубительных работ.

Себестоимость выемки грунта, руб./м<sup>3</sup> определяется по формуле (17):

$$S_W = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{W_{\text{групп}}}, \quad (17)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{общ}}$  – общие эксплуатационные расходы на содержание земснаряда в эксплуатации, руб.;  $W_{\text{групп}}$  – объем вынутого грунта, м<sup>3</sup>;

$$S_W^{\text{до}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{W_{\text{групп}}} = \frac{9783000}{1743000} = 5,61 \text{ руб.};$$

$$S_W^{\text{после}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{W_{\text{групп}}} = \frac{11010000}{2024000} = 5,43 \text{ руб.}$$

Прирост прибыли после проведения модернизации, руб.:

$$\Delta\Pi = (S_W^{\text{до}} - S_W^{\text{после}}) \cdot W_{\text{грунт}}'';$$

$$\Delta\Pi = (5,61 - 5,43) \cdot 2024 = 364320 \text{ руб.}$$

При этом годовой экономический эффект

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (S_W^{\text{до}} - S_W^{\text{после}}) \cdot W_{\text{грунт}}'' - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{мод}}, \quad (18)$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капиталовложений,  $E_{\text{н}} = 0,15$ :

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (5,61 - 5,43) \cdot 2024 - 0,15 \cdot 169320 = 338900 \text{ руб.}$$

Ущерб от подтопления поймы территорий во время паводка рассчитывается по известной формуле [21].

В случае Новосибирской ГЭС регулирование в многоводном 2015 г. осуществлялось так, чтобы не допустить подтопления земель (расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, на отметке ниже 4300 м<sup>3</sup>/с).

По итогам разработанной модели будут решены следующие сформулированные задачи: анализ существующих критериев оптимизации гидротепловых энергосистем; разработка методики определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС на основе теории предельной полезности; создание подхода для оптимизации режимов ГЭС в составе смешанной энергосистемы; наивыгоднейшее распределение нагрузки энергосистемы согласно двум методикам: традиционного метода и методики определения стоимости гидроресурса на основе теории предельной полезности на примере Новосибирской генерирующей компании; нахождение оптимального режима сработки-заполнения водохранилища с точки зрения оптимизации всего ВХК на основе составления матрицы противоречий; создание методики по определению экологического ущерба от деятельности всего ВХК; разработка методики оптимизации режимов работы ВХК на основе критерия максимизации прибыли; построение Парето-оптимального множества для нахождения компромиссного решения при управлении режимами ВХК; построение нейросетевой модели для учета воздействия режима Каменской поймы на отдачу водохранилища; разработка синергетической модели управления режимами функционирования водохозяйственного комплекса на основе эколого-экономического критерия; сравнительный анализ полученных результатов по управлению режимами работы ГЭС с

учетом интересов всех участников ВХК и без него с дальнейшей разработкой рекомендаций для Новосибирской ГЭС и всего ВХК.

В современных условиях, когда число вредных воздействий на окружающую среду неумолимо возрастает, улучшение экологической обстановки является актуальным направлением исследований [10]. В данной работе предлагается увеличивать роль возобновляемых источников энергии на примере ГЭС и тщательно подходить к оценке и возможностям использования гидроресурса без нанесения урона природе всеми участниками водохозяйственного комплекса [11].

Разработанная авторами методика оптимизации режимов работы ГЭС в составе ВХК на основе определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей работы ГЭС основана на сочетании теории предельной полезности и оптимизационной модели [12]. Поскольку ГЭС является базовой отраслью ВХК, оптимизация режимов ее работы позволит оптимизировать работу всего водохозяйственного комплекса стран, что позволит улучшить экологическую политику регионов (Приказ Минсельхоза России № 167 от 31.03.2020, ПДК вредных веществ для водных объектов) и реализовать энергосберегающую политику за счет более бережного отношения к природным ресурсам.

Разработанная авторами модель может быть использована для оптимизации режимов функционирования всего ВХК на основе объединения надежностного, экономического и экологического критериев. Она позволяет учесть взаимовлияние компонентов ВХК друг на друга, а применение эксергетического анализа позволяет выявить новые свойства ГЭС при управлении режимами ВХК в современных условиях, когда главенствующую роль занимают поддержание здоровья и благосостояние нации [15].

Практическая реализация разработанных подходов и методов на примере Новосибирского ВХК и Новосибирской ГЭС (Practical implementation of the developed approaches and methods using the example of the Novosibirsk Water Management Complex and the Novosibirsk Hydroelectric Power Station).

Объектом исследования является Новосибирский ВХК, основой которого является Новосибирская ГЭС. В статье рассматриваются надежность и эколого-экономическая эффективность в качестве основных критериев.

По итогам оптимизации режимов работы ГЭС были получены наивыгоднейшие режимы работы станции для каждого из характерных сезонов года [9].

Практическая апробация разработанной методики на НГЭС позволила получить следующие цены гидроресурса для каждого месяца по сезонам года, таких, как период сработки, наполнения и бытовой сток: средняя стоимость гидроресурса для периода паводка составляет 0,1583 руб./м<sup>3</sup>, для межени – 0,0963 руб./м<sup>3</sup>, для работы на бытовом стоке – 0,119 руб./м<sup>3</sup>.

Далее разработанная авторами синергетическая модель была применена для оптимизации режимов работы всего ВХК.

На примере пользователей ВХК в Новосибирской области составлен «график противоречий» для нижнего бьефа Новосибирской ГЭС (рисунок 6), исходя из которого были выявлены противоречия между такими участниками, как ГЭС и судоходство, с точки зрения требования к расходам в нижнем бьефе для таких навигационных месяцев, как апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь. В связи с невозможностью режима работы ГЭС для обеспечения оптимального расхода в нижнем бьефе на примере месяца апрель, применим Парето-оптимальное множество для обеспечения удовлетворения потребностей участников ВХК.

Поскольку, как показывает анализ матрицы противоречий для Новосибирского ВХК, наиболее критичными с точки зрения взаимоисключающих требований являются такие участники, как ГЭС и судоходство, для нахождения оптимального режима всего ВХК объемная матрица (см. рисунок 6) сводится к решению многокритериальной задачи на плоскости на основе использования Парето-оптимального множества.

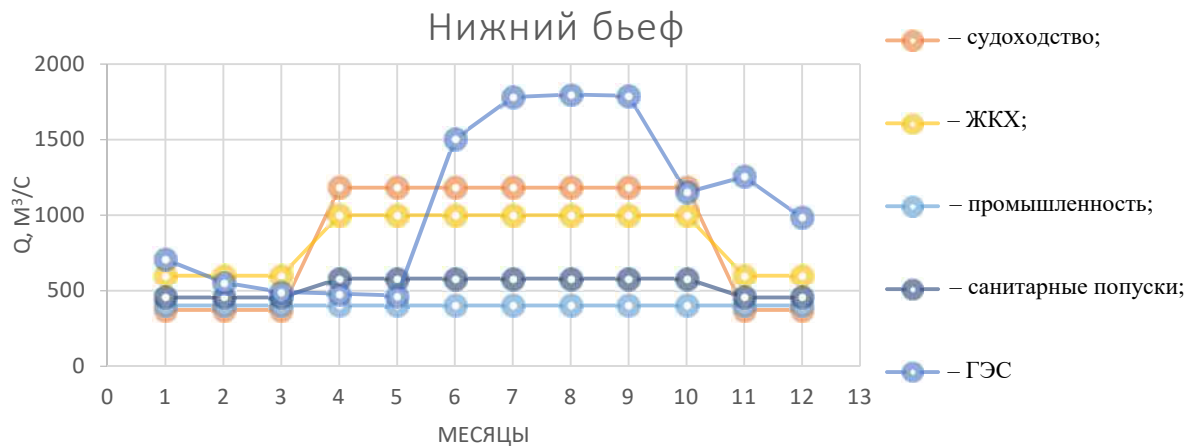


Рисунок 6 – График противоречий для Новосибирского ВХК

В качестве критериев Парето-оптимального множества предлагается использовать экономический (критерий максимизации прибыли) и экологический критерии. В данной статье в качестве взаимоисключающих критериев были рассмотрены максимум прибыли судоходства и максимум прибыли ГЭС (т. е. расход воды для обеспечения гарантированных глубин для судоходства и расход воды на ГЭС для выдачи значений гарантированных мощностей).

На основе полученных точек был получен график компромиссных решений для всего ВХК на примере месяца апрель, исходя из которого можно определить оптимальный режим работы ГЭС по определению полезной емкости водохранилища и стоимости гидроресурса для всех участников ВХК путем выполнения ВЭР для каждой компромиссной точки. Вообще расчет производится для каждого из противоречивых месяцев (рисунок 7).

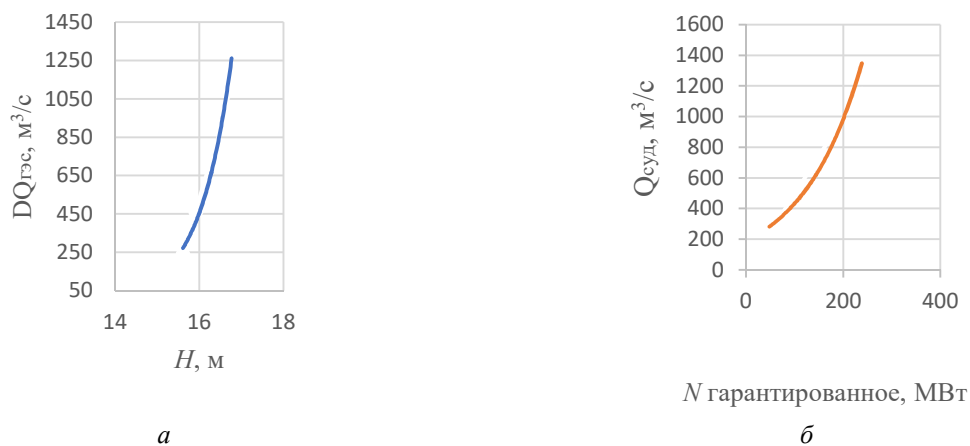


Рисунок 7 – График точек компромиссных решений (а) и Парето-оптимального множества (б) для апреля по оптимизации режимов работы ВХК

На основе анализа точек Парето-оптимального множества согласно принципу минимизации отклонений фактического расхода воды для ВХК от их оптимального значения был выбран оптимальный режим работы всего ВХК. Данным режимом является режим со значением напора 19,8 м, расходом воды через гидроагрегаты ГЭС 1348,942 м<sup>3</sup>/с, уровнем воды в нижнем бьефе 93,65 м, в верхнем – 113,4 м, так как ему соответствует выпуклость вниз на графике компромиссных решений (см. рисунок 6). При этом аналогичные значения согласно морфометрической схеме ГЭС за тот же месяц составляют 832,1 м<sup>3</sup>/с, уровень воды в нижнем бьефе – 93,2 м, в верхнем – 108,793 м.

Как показывает сравнительный анализ полученных результатов, отмечается повышение уровня воды в верхнем и нижнем бьефах, что благоприятно сказывается на режиме водного

транспорта для обеспечения гарантированных глубин в 113 м в навигационный период, а также хорошо для нереста рыбы, поскольку позволяет сэкономить около 0,5 млрд руб. на выпуск мальков для компенсации экологического ущерба. Увеличение расхода воды через гидроагрегаты ГЭС с 832,1 м<sup>3</sup>/с до 1348,942 м<sup>3</sup>/с позволяет повысить выработку электроэнергии, увеличив долю ГЭС в суточном графике нагрузки потребителя, что также улучшает экологическую обстановку в регионе.

Применив теорию предельной полезности, определим стоимость гидроресурса для апреля согласно разработанной авторами методике по определению синергетической стоимости гидроресурса [9]. Как показали расчеты, стоимость гидроресурса за апрель составляет 14 коп./м<sup>3</sup>.

Путем перемножения полученной стоимости гидроресурса с характеристикой относительного прироста расхода воды для периода бытового стока определим график предельных издержек. Используя критерий общественного благосостояния применительно к ВХК, определим оптимальный режим ГЭС по производству мощностей в составе энергосистемы с учетом интересов всех участников ВХК (судоходство применительно к нашему примеру) (рисунок 8).

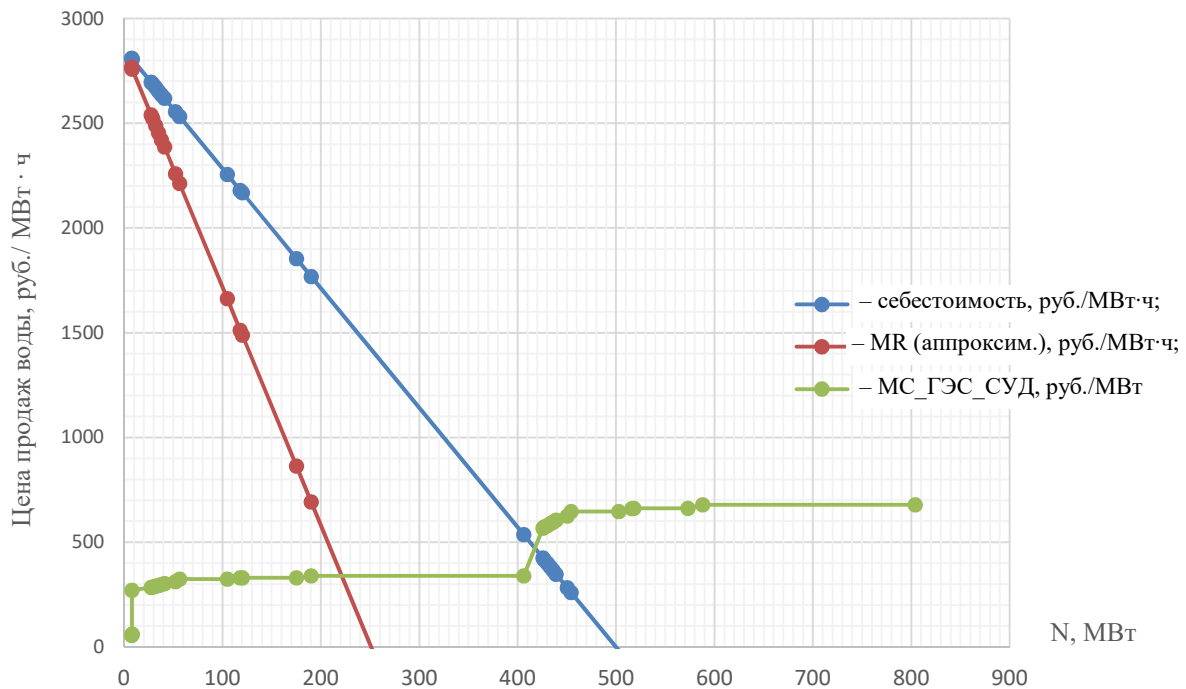


Рисунок 8 – Определение оптимального режима ГЭС в составе ВХК для апреля

Как показывает рисунок 8, оптимальное значение отпускаемой мощности ГЭС с учетом интересов всех участников ВХК составляет 225 МВт при стоимости отпускаемой мощности 1,6 руб./кВт·ч на примере апреля.

Таким образом, как подтверждает сравнительный анализ полученных результатов, отмечается повышение уровня воды в верхнем и нижнем бьефах, что благоприятно сказывается на режиме водного транспорта для обеспечения гарантированных глубин в 113 м в течение навигационного периода, а также хорошо подходит для нереста рыбы, поскольку позволяет сэкономить около 0,5 млрд руб. на выпуск мальков для компенсации экологического ущерба. Увеличение расхода воды через гидроагрегаты ГЭС с 832,1 м<sup>3</sup>/с до 1348,942 м<sup>3</sup>/с позволяет увеличить выработку электроэнергии, увеличив долю ГЭС в суточном графике нагрузки потребителя, что также улучшает экологическую обстановку в регионе. Доход ВХС при этом составляет 3,280043585 млрд руб. за навигационный период судоходства (с апреля по май).

Согласно разработанной синергетической модели при решении оптимизационных задач

обязательным требованием является учет экологической составляющей. Поэтому вопросам оценки компенсационных затрат для возмещения экологического ущерба водным объектам должно быть уделено особое внимание.

На примере Новосибирского водохранилища и нижнего бьефа р. Обь были рассчитаны составляющие экологического ущерба согласно выражению (6).

Расчет экологического ущерба проводился согласно уравнению (6). При этом по статье «экологический ущерб» были учтены затраты на компенсацию ущерба, наносимого рыбному хозяйству, расходы на проведение дноуглубительных работ, затраты от загрязнения окружающей среды вредными веществами. Результаты расчета показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Определение экологического ущерба для Новосибирского ВХК за 2012 г.

Эксперт	Доход экономика, руб	Доход-20% НДС, руб	Затраты экология_рыбки, руб	Затраты экология_дноуглубление, руб	Затраты экология_ВРЕДНЫЕ ВЕЩ-ВА, руб
1	4527511360	3622009088	220196548,4	1101000	2491813812
2	4256090124	3404872099	198176893,6	880800	2242632430
3	3543576936	2834861549	158541514,9	792720	1569842701
4	3409888046	2727910437	150614439,1	618321,6	1444255285
5	3280043585	2624034868	121997695,7	488474,064	1343157415
6	3091944988	2473555990	108577949,2	420087,695	1168546951
7	3059833202	2447866561	99891713,22	365476,2947	1145176012
8	2795295478	2236236382	75917702,05	288726,2728	904689049,7
9	2668532468	2134825975	66807577,8	245417,3319	787079473,2
10	2494514165	1995611332	58122592,69	198788,0388	621792783,8

Окончание таблицы 2

Затраты-экология, руб	Затраты ВХС, руб	Прибыль_валовая, руб	Прибыль_экономика, руб	Прибыль_чистая, руб	Налоги, руб
2713111360	2295615,298	3619713473	906602112,7	770611795,8	135990316,9
2441690124	2295615,298	3402576484	960886359,9	872764634,6	88121725,36
1729176936	2295615,298	2832565934	1103388997	1034849878	68539119,72
1595488046	2295615,298	2725614821	1130126776	1037419457	92707318,84
1465643585	2295615,298	2621739253	1156095668	1075166878	80928789,52
1277544988	2295615,298	2471260375	1193715387	1103159707	90555680,05
1245433202	2295615,298	2445570946	1200137744	1093468028	106669716,7
980895478	2295615,298	2233940767	1253045289	1188542906	64502383,15
854132468,3	2295615,298	2132530359	1278397891	1189900832	88497058,63
680114164,6	2295615,298	1993315716	1313201552	1237493974	75707577,3

Путем опроса мнений экспертов каждой из составляющих экологического ущерба были определены весовые коэффициенты. Полученные результаты исследования приведены на рисунке 9.

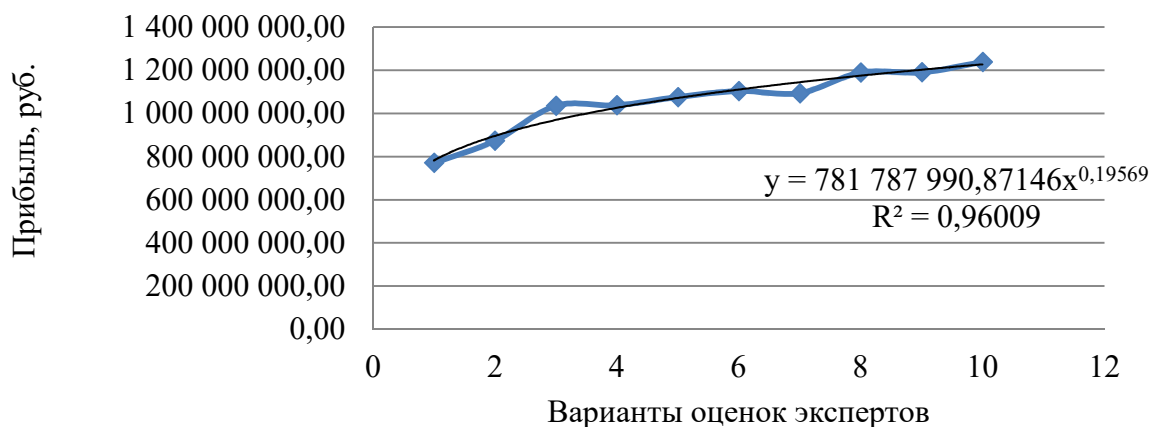


Рисунок 9 – Оптимизация режима водохозяйственного комплекса на основе эколого-экономического критерия

Как видно из рисунка 9, оптимум по результатам хозяйственной деятельности и размерам прибыли для ВХК с учетом компенсации экологического ущерба достигается для пятого варианта распределения затрат между компонентами экологического ущерба согласно мнениям экспертов, поскольку первая производная именно в этой точке принимает значение, равное нулю. Как показывают данные таблицы 2, значение экологического ущерба составляет 2,621 млн руб. При этом затраты водохозяйственной системы на экологию составляют порядка 1,465643585 млрд руб., а доход всей ВХС без учета НДС равен 3,280043585 млрд руб. Чистая прибыль составляет 1,156095668 млрд руб.

Таким образом, предложенная авторами синергетическая оптимизационная модель подходит для проведения оптимизации режимов работы как ГЭС, так и всего ВХК в целом.

Как показывают результаты выполненного исследования:

разработана математическая модель управления функционированием гидро- и тепловых электростанций для краткосрочной оптимизации режимов покрытия графиков нагрузки в условиях рынка, которая позволит перейти от относительного прироста расхода топлива  $b$  к относительному приросту расхода воды  $q$  без использования коэффициента неопределенных множителей Лагранжа;

на основе разработанной модели обосновано использование теории предельной полезности для определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей работы ГЭС для оптимизации режимов работы всего ВХК, т. е. создана универсальная методика;

осуществлена расчетная проверка разработанных подходов и методов и проведена реализация основных положений исследования на конкретных объектах, по результатам которых было выявлено увеличение доли ГЭС в покрытии суточного графика нагрузки порядка 12 %;

была разработана синергетическая модель для нахождения оптимального режима сработки-заполнения водохранилища с точки зрения требований участников ВХК на основе построения синергетической модели;

сравнительный анализ полученных результатов показал, что отмечается повышение уровня воды в верхнем и нижнем бьефе, что благоприятно сказывается на режиме водного транспорта для обеспечения гарантированных глубин в 113 м, а также хорошо для нереста рыбы, поскольку позволяет сэкономить около 0,5 млрд руб. на выпуск мальков для компенсации экологического ущерба. Увеличение расхода воды через гидроагрегаты ГЭС с 832,1 м<sup>3</sup>/с до 1348,942 м<sup>3</sup>/с позволяет увеличить выработку электроэнергии, увеличив долю ГЭС в суточном графике нагрузки потребителя, что также улучшает экологическую обстановку в регионе;

оптимизирован режим работы ВХК на основе разработанной авторами синергетической модели;

произведен расчет экологического ущерба от деятельности водохозяйственной комплекса на примере г. Новосибирск, который составляет 30 % от дохода ВХК и достигает величины в размере 2621,739253 млн руб., и выполнен анализ его составляющих с выдачей рекомендаций для управления режимами функционирования ВХК;

предложенная авторами синергетическая оптимизационная модель подходит для проведения оптимизации режимов работы как ГЭС, так и всего ВХК в целом;

разработанная авторами оптимизационная модель обоснована в силу повышения синергетической эффективности всего ВХК, которая заключается в снижении себестоимости вырабатываемой на НГЭС электроэнергии с учетом неэнергетических требований всех участников ВХС на 1,6 руб. / кВт · ч по сравнению со стоимостью электроэнергии на НГЭС без учета интереса остальных участников водохозяйственной системы, которая составляет 3,6 руб./ кВт · ч.

### Список литературы

1. Sekretarev U.A., Myatezh T.V., Gorshin A.V. Optimization of operating modes of hydropower plants with determination of the price for a hydro resource using complex criteria of ecological and economic efficiency, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 240th ECS Meeting (October 10-14, 2021), DOI:10.1088/1757-899X/1089/1/012038.

2. Секретарев, Ю. А. Оптимальное управление режимами ГЭС в электроэнергетических системах = Optimal management of HPP regimes in electric power systems: монография / Ю. А. Секретарев, Ш. М. Султонов. – Душанбе : Таджикский техн. ун-т им. акад. М. С. Осими, 2020. – 144 с. – Текст : непосредственный.

3. Ksenofontova E.E. The research of operation modes of hydroelectric power station with annual regulation; research adviser Yu. A. Sekretarev; language adviser A. G. Balobanova. *Aspire to Science: materials international scientific conference students, undergraduates and postgraduates*, Novosibirsk (April 18, 2019), pp. 158-162.

4. Skvortsova O., Dashkina A., Petrovskaia E., Terleev V., Nikonorov A., Badenko V., Volkova Y., Pavlov S., 2016, The classification of accidental situations scenarios on hydropower plants, *MATEC Web of Conferences*, 53, 01014, DOI: 10.1051/mateconf/20165301014.

5. Ivanova E.V. Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP; research adviser N. V. Zubova; language adviser A. G. Balobanova. *Aspire to Science: materials international scientific conference students, undergraduates and postgraduates*, Novosibirsk (April 18, 2019), pp. 87-91.

6. Иванова, Е.В. Анализ эффективности использования СЭС и ВЭУ для обеспечения электроэнергией хозяйственных нужд НГЭС / Е. В. Иванова, Н. В. Зубова; [науч. рук. Н. В. Зубова]. – Текст : непосредственный // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019. Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2019. – Ч. 4. – С. 35–38.

7. Moshkin B.N., Myatezh T.V., Sekretarev Y.A., Averbukh M.A. Mathematical model of managing of the generating company on the criterion of the profit maximization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 552, art. 012016 (17 p.), DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012016.

8. Menyaykin D.A. The use of fuzzy logic in the theory of reliability; research adviser Y. A. Sekretarev; language adviser Y. U. Ridnaya, *Progress through Innovations: thesis scientific-practical conference postgraduate and undergraduate students*. Novosibirsk, Novosibirsk State Transport University Publ., 2016, pp. 52-53.

9. Mitrofanov S.V., Armeev D.V., Domahin E.A. Analysis of the Impact of Autonomous Hybrid Power Plants on the Railways Capacity. *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021): proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf.* Novosibirsk, Novosibirsk State Transport University Publ., 2021, pp. 161-165, DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647596.

10. Mitrofanov S.V., Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Arestova A.Y., Sidorova A.V. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 191. The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020). Art. 02004 (6 p.) DOI: 10.1051/e3sconf/202019102004.

11. Mitrofanov S.V., Khalyasmaa A.I., Eroshenko S. A., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kolesnikov A. Integrating GIS technologies in hydro power plant cascade simulation model. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 191. The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020). Art. 02006 (6 p.). DOI: 10.1051/e3sconf/202019102006.

12. Mitrofanov S.V., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kolesnikov A. Application of GIS Technologies to Improve the Efficiency of HPP Cascades Simulation Model. *Journal of Siberian Federal University – Engineering & Technologies*, 2020, no. 13 (6), pp. 732-744.

13. Sekretarev Yu.A., Myateg T.V., Moshkin B.N. Administration functioning power generation companies based on thermal electrical power station on maximization profit criterion, *Proceedings of the higher educational institutions – Electromechanics*, 2016, no. 4 (546), pp. 82-88.

14. Mitrofanov S.V., Kiryanova N.G., Gorlova A.M. Stationary hybrid renewable energy systems for railway electrification: a review. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18. Art. 5946 (21 p.). DOI: 10.3390/en14185946.

15. Mitrofanov S.V., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kalinin A.E. Imitation model development of HPP cascade work. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 116-126.

16. Mitrofanov S.V., Rusina A.G., Achitayev A.A., Gidkov A.A. Studying the Controlled Flexible Coupling of the Micro HPP Turbine and Generator Operating in a Self-Contained Electric Power System. *Electricity*, 2020, no. 1, pp. 25-31.

17. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Sulonov S.M. Appointment of optimal modes of the power system of Tajikistan. *Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering (EEM-2014): Collection of scientific Proceedings of Intern. scientific conf. young scientists*, Novosibirsk (December 2-6, 2014), vol. 1, Section «Electrical Engineering», pp. 107-110.

18. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Sulonov S.M. Implementation of the method of Lagrange for optimal modes of energy system of Tajikistan. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 726-731.

19. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Gdanovich A.A., Panova Ya.V. Decision support system for managing the composition of HPP units. *Electro – Electrical engineering, power engineering, electrical industry*, 2015, no. 5, pp. 18-24.

20. Bik Yu.I., Buchelnikov M.A., Kofeeva V.N. Environmental assessment of the estimated dredging volumes on the Ob River. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 937 (2021) 022042 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/937/2/022042.

21. Руслловые процессы и водные пути рек Обского бассейна : монография / Р. С. Чалов, Е. М. Плескевич, В. А. Баула [и др.]. – Новосибирск : РИПЭЛ плюс, 2001. – 300 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Sekretarev U.A., Myatezh T.V., Gorshin A.V. Optimization of operating modes of hydropower plants with determination of the price for a hydro resource using complex criteria of ecological and economic efficiency, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 240th ECS Meeting (October 10-14, 2021), DOI:10.1088/1757-899X/1089/1/012038.

2. Sekretarev Yu.A., Sulonov Sh.M. *Optimal'noyeypravleniyerezhimami GES v elektroenergeticheskikh sistemakh* = Optimal management of HPP regimes in electric power systems: a monograf. Dushanbe, Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi Publ., 2020, 144 p. (In Russian).

3. Ksenofontova E.E. The research of operation modes of hydroelectric power station with annual regulation; research adviser Yu. A. Sekretarev; language adviser A. G. Balobanova. *Aspire to Science: materials international scientific conference students, undergraduates and postgraduates*, Novosibirsk (April 18, 2019), pp. 158-162.

4. Skvortsova O., Dashkina A., Petrovskaya E., Terleev V., Nikonov A., Badenko V., Volkova Y., Pavlov S., 2016, The classification of accidental situations scenarios on hydropower plants, *MATEC Web of Conferences*, 53, 01014, DOI: 10.1051/mateconf/20165301014.

5. Ivanova E.V. Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP; research adviser N. V. Zubova; language adviser A. G. Balobanova. *Aspire to Science: materials international scientific conference students, undergraduates and postgraduates*, Novosibirsk (April 18, 2019), pp. 87-91.

6. Ivanova Ye.V., Zubova N.V. [Analysis of the efficiency of using SES and wind turbines to provide electricity for the economic needs of NPPs]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 2019, part 4, pp. 35-38 (In Russian).

7. Moshkin B.N., Myatezh T.V., Sekretarev Y.A., Averbukh M.A. Mathematical model of managing of the generating company on the criterion of the profit maximization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 552, art. 012016 (17 p.), DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012016.

8. Menyaykin D.A. The use of fuzzy logic in the theory of reliability; research adviser Y. A. Sekretarev; language adviser Y. U. Ridnaya, *Progress through Innovations: thesis scientific-practical conference postgraduate and undergraduate students*. Novosibirsk, Novosibirsk State Transport University Publ., 2016, pp. 52-53.

9. Mitrofanov S.V., Armeev D.V., Domahin E.A. Analysis of the Impact of Autonomous Hybrid Power Plants on the Railways Capacity. *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2021): proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf.* Novosibirsk, Novosibirsk State Transport University Publ., 2021, pp. 161-165, DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647596.
10. Mitrofanov S.V., Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Arestova A.Y., Sidorova A.V. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 191. The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020). Art. 02004 (6 p.) DOI: 10.1051/e3sconf/202019102004.
11. Mitrofanov S.V., Khalyasmaa A.I., Eroshenko S. A., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kolesnikov A. Integrating GIS technologies in hydro power plant cascade simulation model. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 191. The 3 International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2020). Art. 02006 (6 p.). DOI: 10.1051/e3sconf/202019102006.
12. Mitrofanov S.V., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kolesnikov A. Application of GIS Technologies to Improve the Efficiency of HPP Cascades Simulation Model. *Journal of Siberian Federal University – Engineering & Technologies*, 2020, no. 13 (6), pp. 732-744.
13. Sekretarev Yu.A., Myateg T.V., Moshkin B.N. Administration functioning power generation companies based on thermal electrical power station on maximization profit criterion, *Proceedings of the higher educational institutions – Electromechanics*, 2016, no. 4 (546), pp. 82-88.
14. Mitrofanov S.V., Kiryanova N.G., Gorlova A.M. Stationary hybrid renewable energy systems for railway electrification: a review. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18. Art. 5946 (21 p.). DOI: 10.3390/en14185946.
15. Mitrofanov S.V., Arestova A.Y., Rusina A.G., Kalinin A.E. Imitation model development of HPP cascade work. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 116-126.
16. Mitrofanov S.V., Rusina A.G., Achitaev A.A., Gidkov A.A. Studying the Controlled Flexible Coupling of the Micro HPP Turbine and Generator Operating in a Self-Contained Electric Power System. *Electricity*, 2020, no. 1, pp. 25-31.
17. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Sultonov S.M. Appointment of optimal modes of the power system of Tajikistan. *Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering (EEM-2014): Collection of scientific Proceedings of Intern. scientific conf. young scientists*, Novosibirsk (December 2-6, 2014), vol. 1, Section «Electrical Engineering», pp. 107-110.
18. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Sultonov S.M. Implementation of the method of Lagrange for optimal modes of energy system of Tajikistan. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014, pp. 726-731.
19. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A., Gdanovich A.A., Panova Ya.V. Decision support system for managing the composition of HPP units. *Electro – Electrical engineering, power engineering, electrical industry*, 2015, no. 5, pp. 18-24.
20. Bik Yu.I., Buchelnikov M.A., Kofeewa V.N. Environmental assessment of the estimated dredging volumes on the Ob River. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 937 (2021) 022042 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/937/2/022042.
21. Chalov R.S., Pleskevich Ye.M., Baula V.A. et al. *Ruslovye protsessy i vodnye puti rek Obского basseina: monografiia* [Riverbed processes and waterways of the rivers of the Ob basin : monograph]. Novosibirsk, RIPEL plyus Publ., 2001, 300 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Мятеж Татьяна Владимировна

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Myatezh Tatiana Vladimirovna

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply Systems for Enterprises», NSTU.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.  
E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Phone: +7 (3833) 46-15-51.  
E-mail: tatianamyateg@mail.ru

## Секретарев Юрий Анатольевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2,  
г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Д.т.н., профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.  
E-mail: sekretarevua@mail.ru

## Sekretarev Yuri Anatolievich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073,  
the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the  
department «Power Supply Systems for Enterprises»,  
NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.  
E-mail: sekretarevua@mail.ru

## Мошкин Борис Николаевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2,  
г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

К.т.н., доцент кафедры «Производственного менеджмента и экономики энергетики»

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: bmoshkin@yandex.ru

## Moshkin Boris Nikolaevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073,  
the Russian Federation.

Master of the department «Power Supply Systems  
for Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: bmoshkin@yandex.ru

## Донченко Семен Сергеевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2,  
г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Бакалавр кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

## Donchenko Semen Sergeevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073,  
the Russian Federation.

Bachelor of the department «Power Supply Systems  
for Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Синергетическая модель учета экологического ущерба при оптимизации режимов работы гидроэлектростанций в составе водохозяйственного комплекса на основе критерия максимизации прибыли / Т. В. Мятёж, Ю. А. Секретарев, Б. Н. Мошкин, С. С. Донченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 119 – 136.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Myatezh T.V., Sekretarev Yu.A., Moshkin B.N., Donchenko S.S. A synergetic model for accounting for environmental damage in optimizing the operating modes of hydroelectric power plants as part of a water management complex based on the profit maximization criterion. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 119-136 (In Russian).

УДК 621.331: 621.311

## А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев, Е. О. Анненков

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),  
г. Иркутск, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ 2×25 кВ ПРИ НЕСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ЗАМЕРАХ ПО КОНЦАМ ПЕРЕГОНА

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию возможности применения методики численного интегрирования телеграфных уравнений для определения места повреждения (короткого замыкания на землю или на рельс) в контактной сети 2×25 кВ двухпутной железной дороги при несинхронизированных во времени замерах векторов токов и напряжений по концам перегона. В работе применены ключевые требования по форми-

рованию схем замещения и математических моделей электрических сетей. Сформированы в фазных координатах схема замещения и математическая модель контактной сети  $2 \times 25$  кВ между двумя тяговыми подстанциями для моделирования режима короткого замыкания. В схеме замещения учтены собственные сопротивления проводов, сопротивления взаимоиндукции и емкостные сопротивления каждого провода с каждым проводом, емкостные сопротивления между проводами и землей, тяговые трансформаторы, автотрансформаторные пункты, а также электроподвижной состав. Расчет режима короткого замыкания выполняется в программе расчета в фазных координатах, разработанной на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ. Поскольку полученные результаты являются синхронизированными во времени, то для имитации несинхронизированного замера системы векторов напряжений и токов, полученных по концам перегона, были развернуты таким образом, чтобы собственные и взаимные углы опорных векторов (векторов напряжений в контактном проводе первого пути) были равны  $0^\circ$ . Определение места короткого замыкания выполняется по вычислительной программе, разработанной на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ, реализующей метод численного интегрирования телеграфных уравнений, описывающих режим контактной сети. Исходными данными для формирования графиков изменения напряжений и углов напряжений являются параметры схемы замещения и векторные величины токов и напряжений по концам контактной сети в момент короткого замыкания. Результаты исследования показали, что методика численного интегрирования телеграфных уравнений для определения места повреждения в контактной сети  $2 \times 25$  кВ может применяться и без синхронизации замеров по концам перегона. Выводы: разработанная методика определения места повреждения в контактной сети  $2 \times 25$  кВ железной дороги не требует обязательной синхронизации замеров по концам перегона с помощью систем точного времени, отсутствие синхронизации не сказывается на точности определения места повреждения, также данная методика позволяет провести расчетную синхронизацию измерений.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, несинхронизированные замеры, определение места повреждения, телеграфные уравнения.

**Aleksei V. Esaulov, Stepan G. Tiguntsev, Evgeniy O. Annenkov**

Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation

## **DETERMINATION OF THE FAULT LOCATION IN $2 \times 25$ kV RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM WITH UNSYNCHRONIZED MEASUREMENTS AT THE ENDS OF A RAILWAY TRACK SECTION**

**Abstract.** The article is devoted to the study of the possibility of using the technique of numerical integration of telegraphic equations to determine the location of damage (short circuit to earth or to a rail) in a  $2 \times 25$  kV contact network of a double-track railway with time-unsynchronized measurements of current and voltage vectors at the ends of a railway track section. The paper applies the key requirements for the formation of substitution schemes and mathematical models of electrical networks. A replacement circuit and a mathematical model of a  $2 \times 25$  kV contact network between two traction substations have been formed in phase coordinates to simulate a short circuit mode. The replacement circuit takes into account the intrinsic resistances of the wires, the mutual induction resistances and the capacitive resistances of each wire with each wire, the capacitive resistances between the wires and the ground. The calculation of the short circuit mode is performed in the calculation program in phase coordinates, developed at the Department of Electric Power Plants, Networks and Systems of INRTU. Since the results obtained are synchronized in time, in order to simulate an unsynchronized measurement of the system of voltage and current vectors obtained at the ends of the stage, they were deployed in such a way that the proper and mutual angles of the reference vectors (voltage vectors in the contact wire of the first path) were equal to  $0^\circ$ . The determination of the short circuit location is performed using a computational program developed on the Department of Electrical Stations, Networks and Systems of INRTU, which implements the method of numerical integration of telegraphic equations describing the mode of the contact network. The initial data for the formation of graphs of voltage changes and voltage angles are the parameters of the substitution circuit and the vector values of currents and voltages at the ends of the contact network at the time of a short circuit. The results of the study showed that the technique of numerical integration of telegraphic equations to determine the location of damage in a  $2 \times 25$  kV contact network can be used without synchronizing measurements at the ends of a railway track section. Conclusions: the developed method for determining the location of damage in the  $2 \times 25$  kV contact network of the railway does not require mandatory synchronization of measurements at the ends of a railway track section using accurate time systems, the lack of synchronization does not affect the accuracy of determining the location of damage, and this technique also allows for calculated synchronization of measurements.

**Keywords:** traction power supply system, unsynchronized measurements, fault location determination, telegraph equations.

Ранее авторами данной статьи был представлен метод численного интегрирования телеграфных уравнений [1] и проверена его применимость для определения места повреждения (ОМП) в тяговой сети системы  $2 \times 25$  кВ [2]. Особенностью данного метода является то, что для ОМП с его помощью достаточно фазных величин токов и напряжений в аварийном режиме по обоим концам перегона, зафиксированных, например, цифровым регистратором аварийных процессов (ЦРАПом) [3]. Данный метод ОМП показал высокую точность, погрешность во всех расчетных экспериментах составила 0 % на 40 км пути.

Однако следует отметить, что все расчетные эксперименты проводились с учетом того, что векторы токов и напряжений по обоим концам перегона синхронизированы между собой по времени. На практике синхронизация по времени замеров векторов токов и напряжений производится с помощью систем точного времени, реализуемых на основе глобальных систем навигации и позиционирования (ГЛОНАСС, GPS) (рисунок 1).

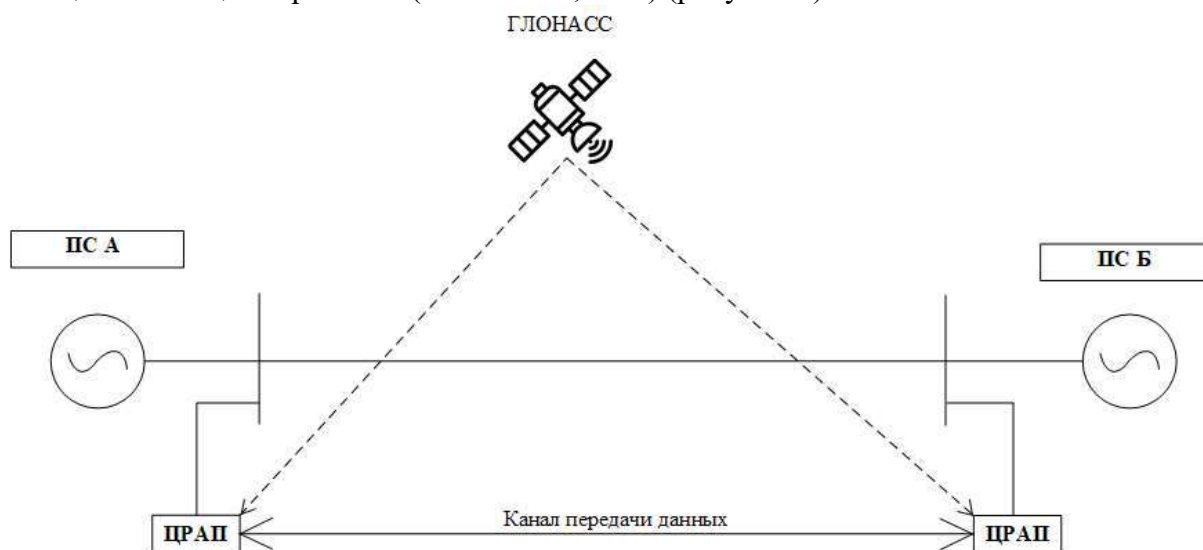


Рисунок 1 – Схема синхронизации по времени замеров векторов токов и напряжений по концам линии

Синхронизация векторов токов и напряжений для ОМП хоть и обеспечивает высокую точность, однако влечет за собой дополнительные затраты на техническую реализацию, что в конечном итоге приведет к увеличению стоимости модернизации тяговых подстанций.

В данной статье будет проверена возможность ОМП в тяговой сети переменного тока системы  $2 \times 25$  кВ методом численного интегрирования телеграфных уравнений при несинхронизированных во времени замерах векторов токов и напряжений по концам перегона.

Аварийный режим короткого замыкания в контактной сети формировался на математической модели контактной сети системы  $2 \times 25$  кВ с помощью программно-вычислительного комплекса «Расчет в фазных координатах». Подробный алгоритм формирования моделей тяговых сетей  $1 \times 25$  кВ и  $2 \times 25$  кВ в данном программно-вычислительном комплексе (ПВК) приведен в статьях [2 и 4]. Схема замещения контактной сети  $2 \times 25$  кВ (рисунок 2) сформирована на основе параметров реального оборудования, а она учитывает сопротивления взаимной индукции и емкостные сопротивления всех элементов тяговой сети. Нагрузка, моделирующая мощность электроподвижного состава (ЭПС) имеет активно-индуктивный характер. Совокупность данных факторов позволяет с большой точностью моделировать режимы, происходящие в реальной тяговой сети. Математическая модель необходима для того, чтобы в расчетном эксперименте получить параметры аварийного режима (ПАР), которые в свою очередь являются исходными данными для ОМП методом численного интегрирования телеграфных уравнений.

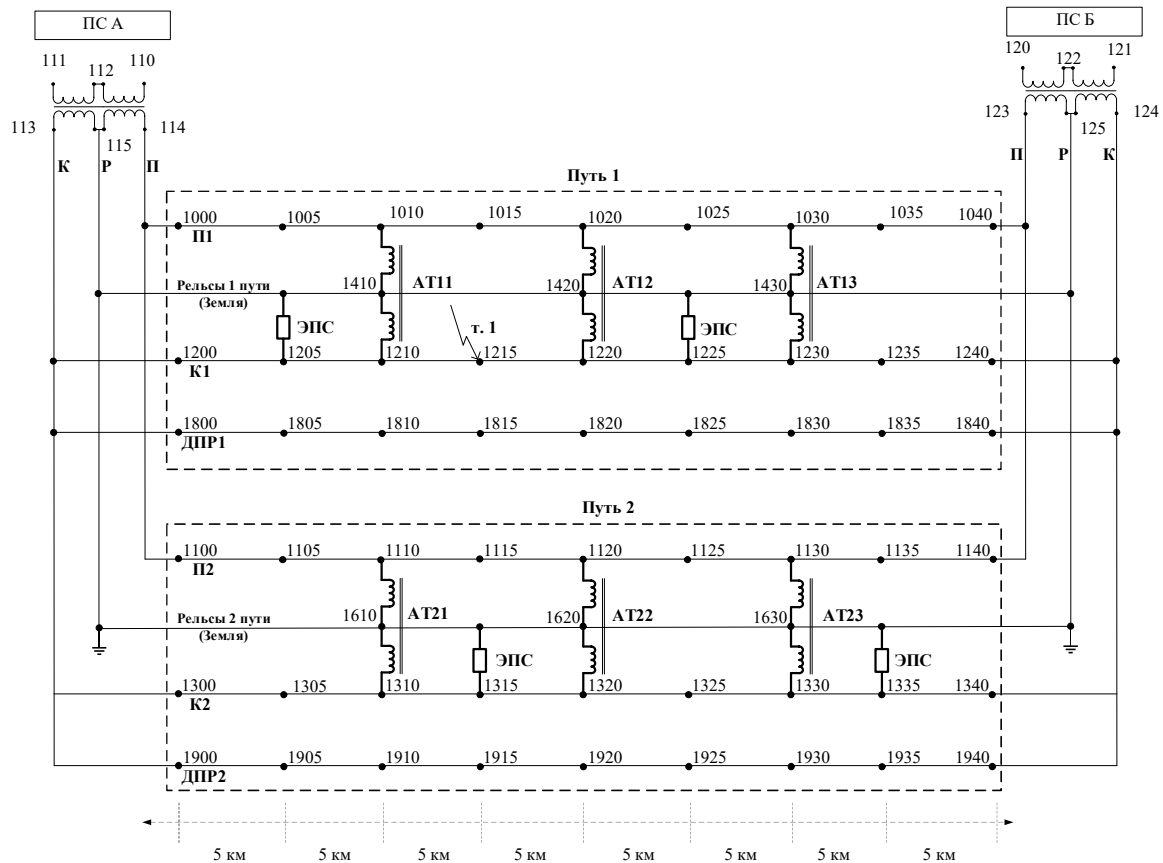


Рисунок 2 – Схема замещения двухпутного перегона контактной сети системы 2×25 кВ

Короткое замыкание контактного провода К1 первого пути на землю задано в программе расчета как нулевое сопротивление между точками 1215 и 1415. Сопротивление дуги может быть учтено ненулевым сопротивлением. Точка короткого замыкания (т. 1) находится на расстоянии 15 км от подстанции (ПС) «А».

При коротком замыкании были зафиксированы комплексные значения токов и напряжений по концам перегона (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Результаты синхронизированного замера в тяговой сети системы 2×25 кВ в начале перегона при коротком замыкании в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	$U, В$	$\varphi_U, ^\circ$	$I, А$	$\varphi_I, ^\circ$
1200 (К1)	26574,17	354,02	1140,94	340,31
1000 (П1)	28677,03	185,55	774,57	170,97
1800 (ДПР1)	26584,72	354,015	152,92	49,02
1300 (К2)	26573,82	354,02	107,24	65,18
1100 (П2)	28671,45	185,55	558,14	186,75
1900 (ДПР2)	26584,72	354,01	152,84	49,05

Таблица 2 – Результаты синхронизированного замера в тяговой сети системы 2×25 кВ в конце перегона при коротком замыкании в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	$U, В$	$\varphi_U, ^\circ$	$I, А$	$\varphi_I, ^\circ$
1240 (К1)	27103,58	347,91	371,18	135,20
1040 (П1)	27932,26	172,04	328,33	271,45
1840 (ДПР1)	27106,1	347,91	150,60	48,43
1340 (К2)	27105,67	347,92	219,53	5,87
1140 (П2)	27933,63	172,05	243,70	227,96
1940 (ДПР2)	27106,84	347,92	150,52	48,46

В результатах, полученных в расчетном эксперименте, все комплексные значения напряжений и токов по концам перегона синхронизированы между собой. Графически на примере векторов напряжений в контактном проводе первого пути (К1) это имеет вид, представленный на рисунке 3.

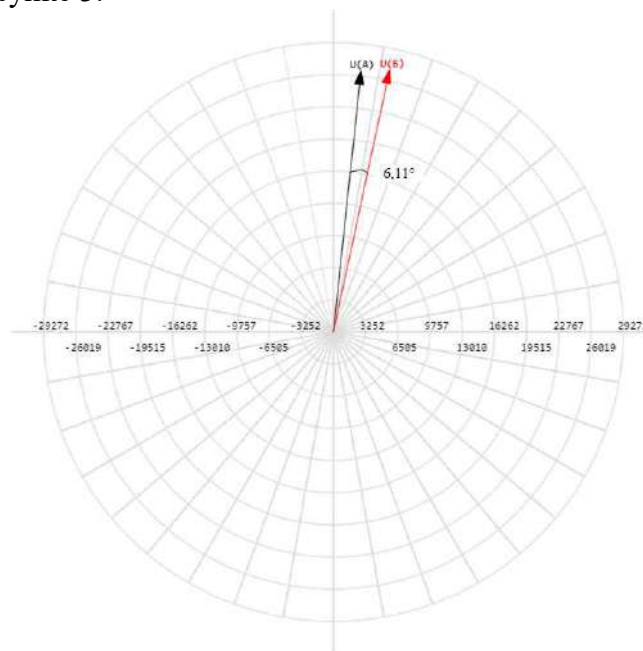


Рисунок 3 – Угол сдвига между векторами напряжений по концам перегона в контактном проводе первого пути при синхронизированных замерах

В реальном аварийном режиме без синхронизации измерений между подстанциями при измерении ПАР ЦРАПами подстанций угол между опорными напряжениями на ПС «А» и ПС «Б» будет равен нулю. Для того чтобы смоделировать результат несинхронизированных по времени замеров напряжений и токов, необходимо в результатах расчетного эксперимента для каждого конца перегона выделить опорный вектор, который будет служить началом отсчета всей системы векторов подстанции, и принять его угол за  $0^\circ$ . В данном исследовании опорными векторами были приняты векторы напряжений по концам перегона в контактном проводе первого пути (рисунок 4).

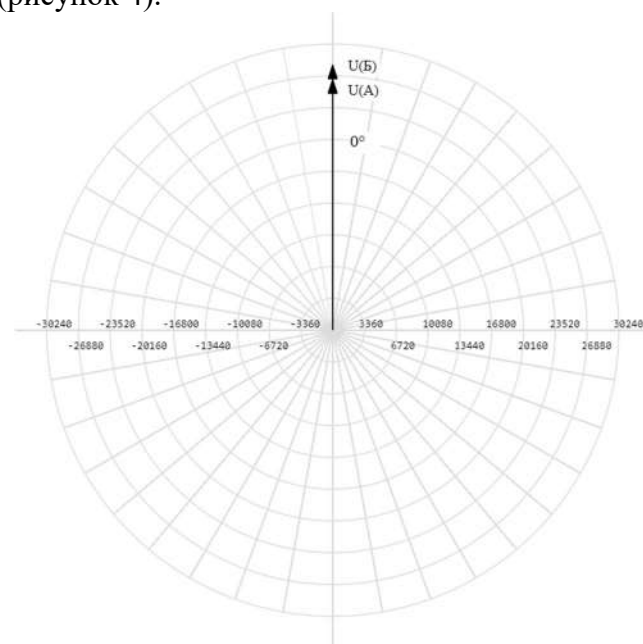


Рисунок 4 – Угол сдвига между векторами напряжений по концам перегона в контактном проводе первого пути при несинхронизированных замерах

Соответственно при несинхронизированных замерах как собственные углы векторов напряжений в контактном проводе К1, так и угол между этими векторами равны  $0^\circ$ . Для системы векторов токов и напряжений, замеренных в начале перегона, угол опорного вектора составляет  $354,02^\circ$  (см. таблицу 1), соответственно для имитации несинхронизированного замера всю систему векторов необходимо развернуть на  $5,98^\circ$ . Полученная информация о комплексных величинах фазных токов и напряжений на подстанциях в начале и конце перегона (таблицы 3 и 4) используется в качестве исходных данных для ОМП в ПВК «ОМП» [6].

Таблица 3 – Результаты несинхронизированного замера в тяговой сети системы  $2 \times 25$  кВ в начале перегона при коротком замыкании (КЗ) в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	$U, \text{В}$	$\varphi_U, ^\circ$	$I, \text{А}$	$\varphi_I, ^\circ$
1200 (К1)	26574,17	0	1140,94	346,29
1000 (П1)	28677,03	191,53	774,57	176,94
1800 (ДПР1)	26584,72	359,99	152,92	55,00
1300 (К2)	26573,82	360,00	107,24	71,16
1100 (П2)	28671,45	191,53	558,14	192,73
1900 (ДПР2)	26584,72	359,99	152,84	55,03

Для системы векторов, замеренных в конце перегона, угол поворота составляет  $12,03^\circ$ .

Таблица 4 – Результаты несинхронизированного замера в тяговой сети системы  $2 \times 25$  кВ в конце перегона при КЗ в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	$U, \text{В}$	$\varphi_U, ^\circ$	$I, \text{А}$	$\varphi_I, ^\circ$
1240 (К1)	27103,58	0	-371,18	147,29
1040 (П1)	27932,26	184,13	-328,33	283,54
1840 (ДПР1)	27106,1	359,99	-150,60	60,52
1340 (К2)	27105,67	360,00	-219,53	17,96
1140 (П2)	27933,63	184,13	-243,70	240,04
1940 (ДПР2)	27106,84	360,00	-150,52	60,55

Данный ПВК, разработанный на кафедре Электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ, позволяет реализовать метод численного интегрирования телеграфных уравнений на практике. Подробная информация о принципах работы в ПВК «ОМП» представлена в статьях [2 и 4]. Вкратце отметим, что метод ОМП с помощью численного интегрирования заключается в построении графиков пошагового вычисления модулей и углов напряжений с одного конца перегона до другого. Поиск места повреждения осуществляется по двум критериям. Первый критерий – это точка пересечения графиков модулей напряжений от каждого из концов рассматриваемого перегона. Если точек пересечения несколько, то для определения места повреждения необходимо руководствоваться вторым критерием. Вторым критерий – это точка пересечения графиков углов напряжений от каждого из концов перегона. В точке КЗ должны совпадать модуль и угол напряжения, т. е. точки пересечения графиков должны соответствовать одинаковым значениям по оси абсцисс (расстояние от ПС до места повреждения).

В результате расчета ОМП после внесения исходных данных о ПАР были получены результаты, представляющие графики пошагового изменения модулей и углов напряжений в зависимости от расстояния от тяговых подстанций (рисунки 5 и 6).

График № 1 на рисунках 5 и 6 соответствует пошаговому изменению модулей (см. рисунок 5) и углов (см. рисунок 6) напряжений от ПС «А» до ПС «Б» с шагом в 1 км. График № 2 соответственно отображает пошаговое изменение модулей и углов напряжений от ПС «Б» до ПС «А».

Анализируя полученные точки пересечения графиков модулей напряжений на рисунке 5, видим две точки пересечения. Точка пересечения графиков углов напряжений на рисунке 6 по оси абсцисс не совпадает с точками пересечения модулей напряжений на рисунке 5, т. е. не

выполняются требования второго критерия, следовательно, невозможно установить «истинную» точку КЗ. Рассмотрим, как определить, какая из точек КЗ на графике рисунка 5 соответствует реальному месту повреждения.

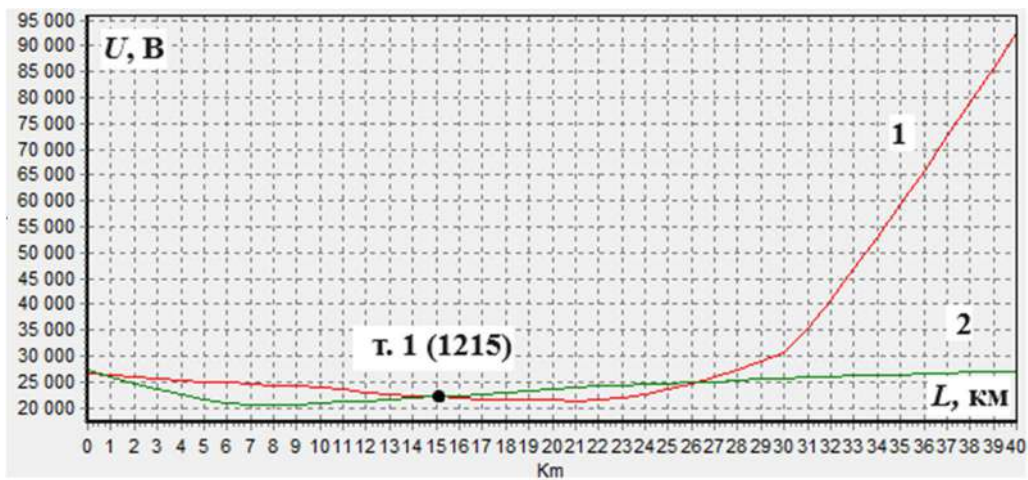


Рисунок 5 – Графики модулей напряжений в контактном проводе первого пути (К1), полученные в ПВК «ОМП» для т.1 (1215)



Рисунок 6 – Графики углов напряжений в контактном проводе первого пути (К1), полученные в ПВК «ОМП» для т. 1 (1215)

Из расчетного эксперимента расчета режима сети известно, что т. 1 (1215) соответствует точке КЗ в контактном проводе первого пути на удалении 15 км от ПС «А». На рисунке 5 видно, что одна из точек пересечения графиков изменения модулей напряжения соответствует этому расстоянию (рисунок 7).

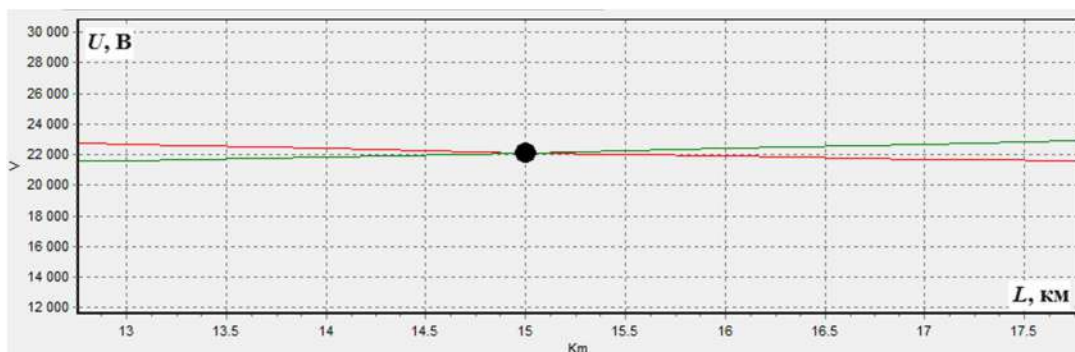


Рисунок 7 – Точка пересечения графиков изменения модулей напряжения в контактном проводе К1 при КЗ в т. 1 (1215)

Расхождение между расстояниями от нуля до точек пересечения графиков изменений модулей (см. рисунок 7) и углов (рисунок 8) напряжения объясняется тем, что исходными данными для ОМП служили несинхронизированные по времени замеры напряжений и токов.



Рисунок 8 – Точка пересечения графиков изменения углов напряжения в контактном проводе К1 при КЗ в т. 1 (1215)

Из таблиц 1, 2 и рисунка 3 видно, что угол между векторами напряжений в контактном проводе К1 по концам перегона составляет  $6,11^\circ$ . Однако при несинхронизированных по времени замерах данный угол нам неизвестен, и поэтому он принимается равным  $0^\circ$  (см. таблицы 3, 4 и рисунок 4). Если на графики пошагового изменения модулей напряжения данное допущение не оказывает никакого влияния, то при анализе графиков изменения углов напряжения следует учитывать, что точка пересечения будет иметь сдвиг по оси абсцисс относительно точки КЗ.

Также примечателен факт того, что в истинной точке КЗ разность между углами по оси ординат составляет  $6,11^\circ$ , что соответствует углу между векторами напряжений в исследуемом контактном проводе К1 по концам перегона при синхронизированных во времени замерах. Данная информация позволит провести синхронизацию несинхронизированных замеров векторных напряжений и токов, а следовательно, избежать погрешности ОМП по изменению углов напряжений. Для этого на ПС «А» оставляем измерения, приведенные в таблице 3, а углы напряжений и токов в таблице 4 (ПС «Б») изменяем на  $6,11^\circ$  (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты синхронизированного с помощью метода численного интегрирования телеграфных уравнений замера в тяговой сети системы  $2 \times 25$  кВ в конце перегона (ПС «Б») при коротком замыкании в т. 1 (1215)

Номер узла/элемент сети	$U$ , В	$\varphi_U$ , °	$I$ , А	$\varphi_I$ , °
1240 (К1)	27103,58	353,89	371,18	141,18
1040 (П1)	27932,26	178,02	328,33	277,43
1840 (ДПР1)	27106,10	353,89	150,60	54,41
1340 (К2)	27105,67	353,89	219,53	11,85
1140 (П2)	27933,63	178,03	243,70	233,94
1940 (ДПР2)	27106,84	353,90	150,52	54,44

В ПВК «ОМП» получены результаты, приведенные на рисунках 9 и 10. Из результатов ОМП, представленных на рисунках 9 и 10, видно, что после синхронизации векторных измерений напряжений и токов по концам перегона точки пересечения графиков изменения модулей и углов напряжения совпадают и соответствуют заданной точке 1 (1215). Следовательно, место повреждения в контактном проводе определено верно. Погрешность составляет 0 %.

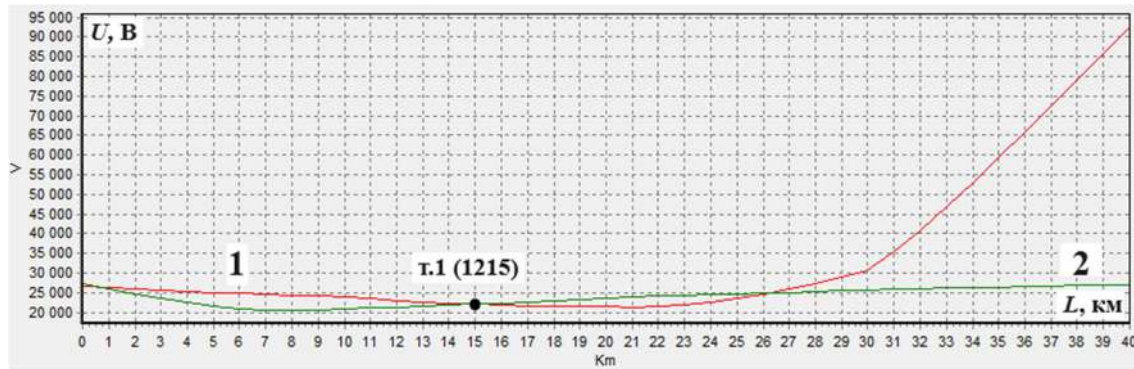


Рисунок 9 – Графики модулей напряжений в контактном проводе первого пути (К1), полученные в ПВК «ОМП» для т. 1 (1215) после синхронизации

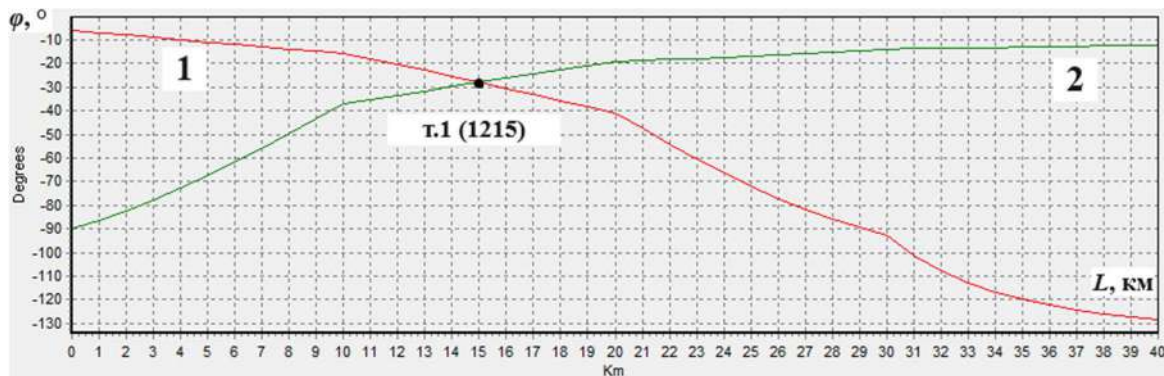


Рисунок 10 – Графики углов напряжений в контактном проводе первого пути (К1), полученные в ПВК «ОМП» для т.1 (1215) после синхронизации

При определении места КЗ в реальных электрических сетях рекомендуется провести расчетную синхронизацию измерений по реализованной выше методике. Для этого производится расчет ОМП по изначально измеренным ПАР. Затем на графиках углов напряжений находится разница между графиками 1 и 2 в точке, соответствующей пересечению графиков модулей напряжений (здесь  $6,11^\circ$ ). На величину этой разницы изменяются углы напряжений и токов в измерениях ПАР на ПС «Б» и выполняется расчет ОМП.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Способ определения места повреждения в тяговой сети  $2 \times 25$  кВ, основанный на методе численного интегрирования телеграфных уравнений, не требует обязательной синхронизации замеров токов и напряжений по концам перегона с помощью систем точного времени.

2. Метод численного интегрирования показывает высокую точность даже при несинхронизированных замерах. Расхождение определенной с помощью данного метода точки КЗ с заранее установленной в расчетном эксперименте точкой КЗ в математической модели составило 0 %, т. е. в реальных условиях погрешность ОМП будет зависеть лишь от погрешностей измерительных трансформаторов токов и напряжений, а также от погрешности в определении параметров схемы замещения перегона.

3. При определении места КЗ в реальных электрических сетях рекомендуется провести расчетную синхронизацию измерений по предложенной методике.

### Список литературы

1. Тигунцев, С. Г. Определение мест коротких замыканий на длинных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения / С. Г. Тигунцев. – Текст : непосредственный // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление : материалы всерос. конф. / Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – Иркутск, 2015. – С. 357–360.

2. Есаулов, В. А. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ / А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев, Е. О. Анненков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 101–112.

3. Пуляев, В. И. Цифровые регистраторы аварийных событий энергосистем / В. И. Пуляев, Ю. В. Усачев. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 1999. – 80 с. – Текст : непосредственный.

4. Есаулов, А. В. Определение места повреждения в тяговой сети системы 25 кВ / А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 120–127.

5. Закарюкин, В. П. Моделирование систем тягового электроснабжения : учебное пособие / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Москва : Директ-Медиа, 2021. – 216 с. – Текст : непосредственный.

6. Анненков Е. О., Тигунцев С. Г. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2024615358, приоритет 21.02.2024.

## References

1. Tiguntsev S.G. [Determination of short-circuit locations on long power transmission lines of high and ultrahigh voltage]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoe razvitie i upravlenie : materialy vs Rossiiskoi konferentsii* [Energy of Russia in the XXI century. Innovative development and Management : materials of the All-Russian Conference]. Irkutsk, 2015, pp. 357-360 (In Russian).

2. Esaulov A.V., Tiguntsev S.G., Annenkov E.O. Determination of the fault location in 2×25 kV railway power supply system. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 4 (56), pp. 101-112 (In Russian).

3. Pulyaev V.I., Usachev Y.V. *Tsifrovye registratory avariinykh sobytii energosistem* [Digital recorders of emergency events of power systems]. Moscow, Energoprogress Publ., 1999, 80 p. (In Russian).

4. Esaulov A.V., Tiguntsev S.G. Determination of the fault location in 25 kV railway power supply system. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 120-127 (In Russian).

5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie sistem tiagovogo elektrosnabzheniia : uchebnoe posobie* [Modeling of traction power supply systems : textbook]. Moscow : Direct Media Publ., 2021, 216 p. (In Russian).

6. Annenkov E.O., Tiguntsev S.G. *Certificate of state registration of a computer program*, no. 2024615358, priority 21.02.2024.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Есаулов Алексей Владимирович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (950) 093-36-73.

E-mail: alex.esaulov98@mail.ru

### Тигунцев Степан Георгиевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», ИРНИТУ.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Esaulov Alexey Vladimirovich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Phone: +7 (950) 093-36-73.

E-mail: alex.esaulov98@mail.ru

### Tiguntsev Stepan Georgievich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Тел.: +7 (914) 927-81-77.  
E-mail: stiguncev@yandex.ru

Phone: +7 (914) 927-81-77.  
E-mail: stiguncev@yandex.ru

## Анненков Евгений Олегович

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 644074, Российская Федерация.

Учебный мастер-программист кафедры «Электрические, станции сети и системы», ИРНИТУ.

Тел.: +7 (914) 887-90-30.

E-mail: kejio@yandex.ru

## Annenkov Evgeniy Olegovich

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Educational master programmer of the department «Electric power stations, networks and systems», INRTU.

Phone: +7 (914) 887-90-30.

E-mail: kejio@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Есаулов, А. В. Определение места повреждения в тяговой сети системы 2×25 кВ при несинхронизированных замерах по концам перегона / А. В. Есаулов, С. Г. Тигунцев, Е. О. Анненков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 136 – 146.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Esaulov A.V., Tiguntsev S.G., Annenkov E.O. Determination of the fault location in 2×25 kV railway power supply system with unsynchronized measurements at the ends of a railway track section. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 136-146 (In Russian).

УДК 656.259.41

## А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. А. Алексеенко, М. В. Кузин

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНТЕРФЕЙСА КЛАССИФИКАТОРА ВЕСА ДЛЯ ГОРОЧНОЙ АВТОМАТИКИ

**Аннотация.** В статье рассматривается задача разработки устройства сопряжения классификатора веса горочного КВГ-15, предназначенного для определения весовой нагрузки от подвижного состава на рельс в тоннах, с блоком ввода информации измерительного участка комплекса горочного микропроцессорного ИУ КГМ системы автоматизации технологических процессов расформирования составов на сортировочных горках КГМ-ПК, принимающего информацию в виде шести дискретных сигналов, соответствующих весовым категориям отцепов. Приведено обоснование необходимости данной разработки в связи с модернизацией напольных устройств и установкой весомера типа КВГ-15, показана структурная схема размещения оборудования КВГ-15, в том числе балки с магнитным датчиком перемещения, блока передачи данных и постовой аппаратуры, дано описание напольного оборудования и его связи с постовыми устройствами. Для разработки устройства сопряжения был выполнен анализ структуры разрабатываемой системы и разработана функциональная схема информационного канала, являющегося стирающим каналом связи с допустимой трансформацией символов. Представлена принципиальная электрическая схема блока преобразователя интерфейса на базе микроконтроллера с описанием назначения элементов схемы. Описана логика работы преобразователя интерфейса. Для приведения в соответствие логике работы весомера была проведена корректировка исходного текста программы, позволяющего защитить передаваемое сообщение от опасного искажения – стирания или трансформации единичного разряда. Отмечены изменения программного кода микроконтроллера и показаны исходный и откорректированный выходные сигналы весовой категории. Откорректированный порядок сигналов позволяет не только легче выявлять отсутствие одного или нескольких сигналов, но и обеспечить избыточность сигнала. Разработанный преобразователь интерфейса позволяет увязать существующее напольное оборудование с постовым, используя современные интерфейсы связи.

**Ключевые слова:** сортировочная горка, тормозная позиция, весомер, измерительный участок, преобразователь интерфейса, микроконтроллер.

## Andrey V. Pulyakov, Maxim E. Skorobogatov, Vladimir A. Alekseenko, Maxim V. Kuzin

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

## WEIGHT CLASSIFIER INTERFACE CONVERTER FOR HUMP AUTOMATION

**Abstract.** The article discusses the problem of developing a device for coupling the hump weight classifier KVG-15, designed to determine the weight load of rolling stock on the rail in tons, with the information input unit of the measuring

*section of the hump microprocessor complex IU KGM of the system for automating technological processes of dismantling trains on hump yards KGM-PK, which receives information in the form of six discrete signals corresponding to the weight categories of the release. A justification is given for the need for this development in connection with the modernization of floor-standing devices and the installation of a KVG-15 type weight meter, a structural diagram of the placement of KVG-15 equipment is shown, including a beam with a magnetic displacement sensor, a data transmission unit and station equipment, a description is given of the floor-standing equipment and its communication with station devices. To develop an interface device, an analysis of the structure of the system being developed was carried out and a functional diagram of the information channel was developed, the latter being an erasing communication channel with an acceptable transformation of symbols. A schematic electrical diagram of the microcontroller-based interface converter unit is presented with a description of the purpose of the circuit elements. The operating logic of the interface converter is described. To bring it into line with the logic of the weight meter's operation, the source code of the program was adjusted to protect the transmitted message from dangerous distortion - erasure or transformation of a single digit. Changes in the microcontroller program code are noted and the original and corrected output signals of the weight category are shown. The adjusted signal order not only makes it easier to detect the absence of one or more signals, but also ensures signal redundancy. The developed interface converter allows to link existing floor equipment with station equipment using modern communication interfaces.*

**Keywords:** *sorting hump, braking position, weight meter, measuring section, interface converter, microcontroller*

Неотъемлемой частью процесса перевозки грузов по сети железных дорог является работа, связанная с формированием и расформированием грузовых составов на сортировочных станциях, с обязательным обеспечением безопасности и бесперебойности их следования. На сети железных дорог Российской Федерации в настоящее время основной объем сортировочной работы производится на механизированных и автоматизированных сортировочных горках [1, 2].

Сортировочные горки представляют собой сложный комплекс технических сооружений, систем и устройств, использующий все современные достижения в области технологий и управления транспортными процессами и объектами с широким применением современной микропроцессорной техники и информационных технологий, играющий важную роль в обеспечении своевременной доставки грузов клиентам в требуемые сроки и в сохранности.

Основными системами и устройствами на сортировочных горках, обеспечивающими механизацию и автоматизацию процесса роспуска составов как на сети железных дорог ОАО «РЖД», так и на зарубежных железных дорогах, являются системы автоматизации сортировочного процесса и устройства горочной автоматики [2 – 5]. От надежности и эффективности работы горочных устройств и систем, от своевременного и качественного их технического обслуживания, от обеспечения необходимых функциональных возможностей для операторов системы с исключением влияния человеческого фактора на роспуск составов как в автоматическом, так и ручном режиме, во многом зависит и эффективность функционирования железнодорожного транспорта. Поэтому вопросам совершенствования сортировочного процесса уделяется пристальное внимание [6 – 10].

В настоящее время на сортировочных горках сети железных дорог ОАО «РЖД» реализуется концепция интервально-прицельного регулирования скорости отцепов, в соответствии с которой горки оборудуются замедлителями и измерителями скорости, образующими в совокупности тормозные позиции. С целью предварительного определения степени торможения отцепов, въезжающих на замедлители, в системах регулирования скорости скатывания отцепов используют весомеры, задачей которых из-за низкой точности измерения веса является определение весовой категории отцепа [11 – 14].

Нечетная сортировочная горка станции Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги в целях автоматизации процесса роспуска составов и централизованного управления стрелками и замедлителями оборудована комплексом КГМ-ПК. Первая и вторая тормозные позиции оборудованы замедлителями, управление которыми осуществляется в автоматическом режиме от КГМ-ПК, а в ручном режиме с пульта оператора. Третья тормозная позиция оборудована замедлителями, управление которыми осуществляется с маневровых вышек [15].

В ходе модернизации напольных устройств КГМ механический весомер ВВ-65-6 был заменен на тензометрический весомер производства ООО «Спринт» (г. Екатеринбург). Весомер состоял из датчиков – тензорезисторов, размещенных на измерительном рельсе, преобразователя сигналов, размещенного в путевом ящике, и контроллера, размещенного в машинном зале. В блок измерительного участка (ИУ КГМ) информация передавалась посредством шести дискретных сигналов, соответствующих весовым категориям. Устройства были разработаны на элементной базе 1980-х гг. производства СССР. Вследствие устаревшей элементной базы, отсутствия технической поддержки и невозможности приобретения аналогичного весомера взамен вышедшего из строя было принято решение о его замене на имеющийся в наличии весомер КВГ-15 [16].

Классификатор веса горочный КВГ-15 производится ЗАО «Электромеханический завод» (г. Молодечно, Республика Беларусь). Структурная схема размещения оборудования КВГ-15 показана на рисунке 1.

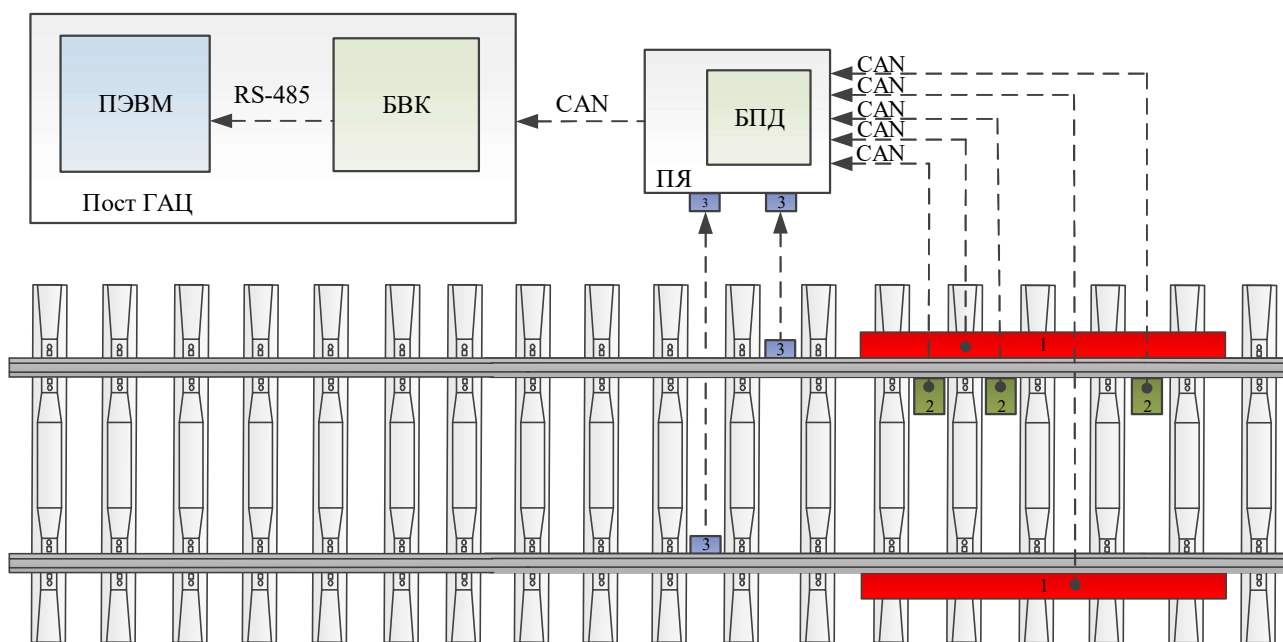


Рисунок 1 – Схема размещения оборудования КВГ-15: 1 – балка с магнитным датчиком перемещения; 2 – датчик колесных пар; 3 – устройство отвода грозовых разрядов

Состав напольной части устройства включает в себя две балки с магнитными датчиками перемещения (ДПМ), два датчика колесных пар (ДКП-2), два устройства отвода грозовых разрядов, подключаемых к каждому рельсу, и один блок подключения датчиков (БПД). Все датчики передают информацию по CAN-шине. Блок подключения датчиков размещается в путевом ящике (ПЯ) и представляет собой клеммную коробку, не содержит электронных компонентов. Связь с горочным постом также происходит по CAN-шине. На горочном посту располагается блок весового классификатора (БВК). Он служит для настройки и тарировки весомера, индикации работы и передачи сигнала на ПЭВМ. Информация передается по последовательному интерфейсу RS-485.

В связи с тем, что вывод данных с КВГ-15 происходит по интерфейсу RS-485 в виде значения в тоннах, а ввод в блок ИУ КГМ осуществляется в виде шести дискретных сигналов, соответствующих весовым категориям, возникла необходимость в разработке устройства сопряжения.

**Разработка функциональной схемы информационного канала.** Для разработки устройства сопряжения был выполнен анализ структуры разрабатываемой системы. Для этого была разработана функциональная схема информационного канала, представленная на рисунке 2.

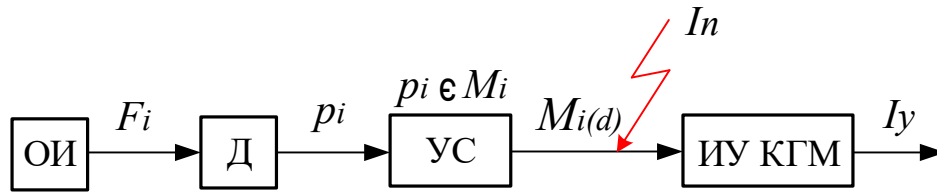


Рисунок 2 – Функциональная схема информационного канала

При взаимодействии с объектом измерения (ОИ) на датчики весомера (Д) воздействует ударная сила  $F_i$ , которая в зависимости от значения амплитуды должна быть преобразована в сигнал двоичного кода, соответствующий величине массы объекта в тоннах, далее устройство сопряжения (УС) должно выполнить однозначную классификацию полученной информации, т. е. отнести ее к одному из массивов  $M_i$ , соответствующих определенной весовой категории, представленных в таблице 1, и выполнить ее преобразование в формат дискретного сообщения  $M_i(d)$ . Далее информация в формате  $M_i(d)$  должна поступить в блок ИУ КГМ, который на ее основе формирует сигнал управления вагонными замедлителями  $I_y$ .

Таблица 1 – Кодирование массивов весовых категорий

Весовая категория	Диапазон веса отцепов, т	Код категории отцепа
$M_1$ (Л)	0...28	100000
$M_2$ (ЛС)	28...44	010000
$M_3$ (С)	44...60	001000
$M_4$ (СТ)	60...72	000100
$M_5$ (Т)	72...84	000010
$M_6$ (ОТ)	84 и более	000001

Учитывая специфику работы блока ИУ КГМ, для передачи информации о весовой категории  $M_i(d)$  выбран унитарный двоичный код 1 из 6 с фиксированной длиной кодового слова. Информацию о весовой категории несет разряд кодового слова, содержащий логическую единицу. Декодирующий узел блока ИУ КГМ принимает шестизначное двоичное кодовое слово и выполняет его проверку, начиная с младшего разряда. Позиция единичного разряда принятого кодового слова определяет присвоенную весовую категорию  $M_i$ .

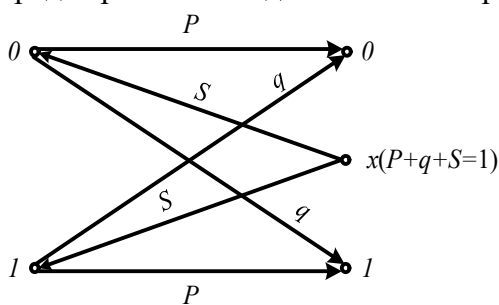


Рисунок 3 – Канал со стиранием и трансформацией символов

Особенностью выбранной структуры информационного канала является возможное воздействие сигнала помехи  $I_n$  или обрыв интерфейсного проводника между УС и ИУ КГМ. Таким образом, рассматриваемый канал связи является стирающим каналом с допустимой трансформацией символов. Модель такого канала представлена на рисунке 3 [17].

Если на вход такого канала поступают символы 0 и 1, которые с вероятностью  $P$  передаются правильно и с вероятностью  $q$  стираются, то на выходе получаются три различных символа – 0, 1,  $x$  (стертые символы). Ошибки, возникающие в передаваемом сообщении, с высокой долей вероятности будут происходить независимо одна от другой, их распределение подчиняется биномиальному закону. В этом случае предположим, что вероятность поражения каждого символа  $p_s$  передаваемой последовательности является величиной постоянной. Тогда вероятность безошибочного его приема –  $(1 - p_s)^n$ , а вероятность распределения ошибок при передаче последовательности из  $n$  символов

$$P = \sum_{i=0}^n C_n^i p_3^i (1 - p_3)^{n-i}, \quad (1)$$

где  $i$  – кратность ошибки в последовательности;

$C_n^i$  – число сочетаний из  $n$  по  $i$ ,

$$C_n^i = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-i+1)}{i!}. \quad (2)$$

Каждый член суммы  $C_n^i$ ,  $p_3^i$ ,  $(1 - p_3)^{n-i}$  в формуле (1) характеризует вероятность появления  $i$  – кратной ошибки в передаваемой последовательности [17].

Рассмотрим влияние одиночных ошибок для данного информационного канала. Для рассматриваемого проводного канала принимаем величину  $p_3 = 3,08 \cdot 10^{-4}$ , для кода 1 из 6 тогда число сочетаний составит  $C_6^1 = 6$ , а величина  $(1 - p_3)^{n-i}$  в соответствии с работой [17] составит 0,9999, тогда по формуле (1) получим вероятность ошибочной передачи

$$P = 6 \cdot 3,08 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9999 = 1,847 \cdot 10^{-3}.$$

То есть примерно два случая ошибочной передачи на каждую тысячу сообщений. Учитывая, что количество обрабатываемых объектов весомером составляет от 2100 до 2800 в сутки, данное обстоятельство может привести к неправильной работе горочного комплекса. При разработке устройства сопряжения необходимо предусмотреть защиту от искажения информации или минимизировать риски выбора неправильного режима торможения.

В качестве устройства сопряжения разработан блок преобразователя интерфейса, учитывающий все описанные выше факторы.

**Блок преобразователя интерфейса.** Принципиальная электрическая схема устройства сопряжения представлена на рисунке 4. Разрабатываемое устройство было размещено в корпусе контроллера весомера разработки ООО «Спринт», что позволило использовать имеющиеся кабели и разъемы.

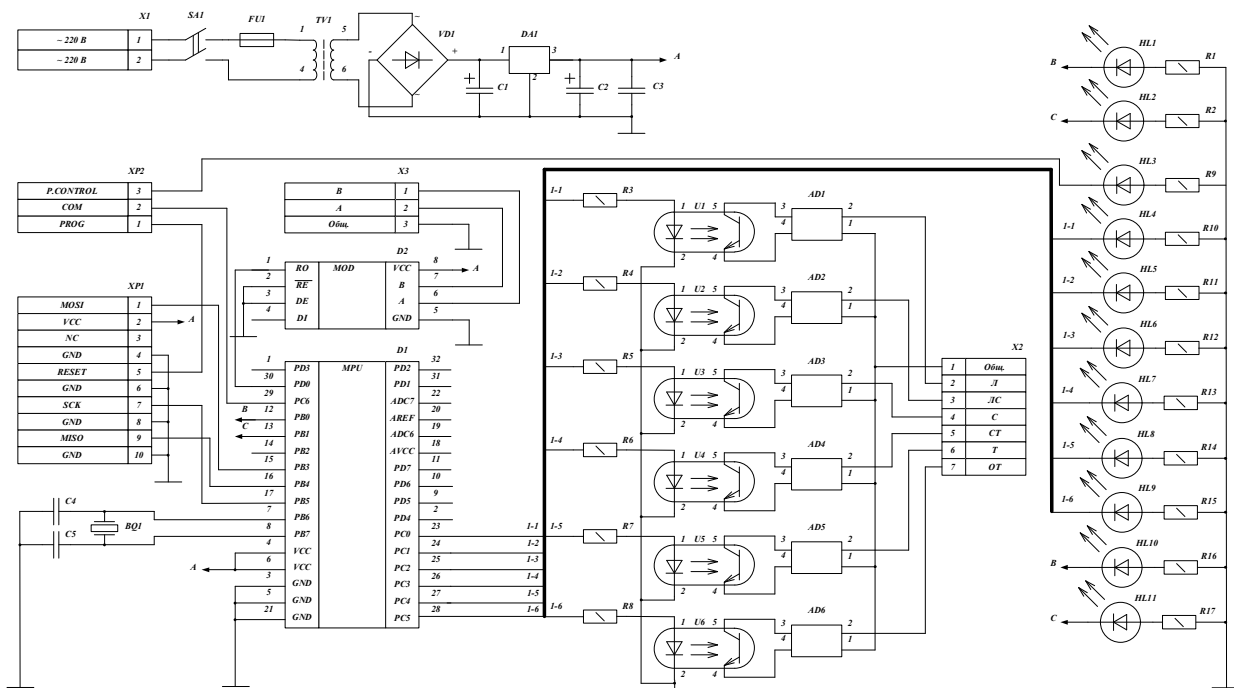


Рисунок 4 – Принципиальная схема блока преобразователя интерфейса

Питание устройства осуществляется блоком питания с трансформатором типа ТП-121-4 и стабилизатором DA1 типа LM7805CT и выходным напряжением +5В. Сигнал поступает с

разъема X3 на микросхему преобразователя интерфейсов RS485/RS232 D2 типа MAX485CPA, после чего сигнал передается на микроконтроллер D1 типа ATmega8-16AU. Значение массы оси сравнивается с пороговыми значениями для определения весовой категории. В соответствии с весовой категорией подается значение логической единицы на соответствующий вывод PC0-PC5. Затем сигнал через оптопару U1-U6 и диодный мост AD1-AD6 поступает на выходной разъем X2.

В схеме предусмотрен разъем для программирования микроконтроллера XP1. Установкой переключки XP2 выбирается режим работы устройства:

- 1-2 – программирование;
- 2-3 – рабочий режим.

Использование корпуса контроллера оригинального весомера для размещения печатной платы БПИ позволило применить имеющиеся средства индикации в виде восьми светодиодов, назначение которых представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Индикаторы блока преобразователя интерфейса

Номер	Цвет	Назначение
HL4	Желтый	Первая весовая категория
HL5	Желтый	Вторая весовая категория
HL6	Желтый	Третья весовая категория
HL7	Желтый	Четвертая весовая категория
HL8	Желтый	Пятая весовая категория
HL9	Желтый	Шестая весовая категория
HL10	Красный	Неисправность
HL11	Зеленый	Нормальная работа

Для добавления индикации в принципиальную схему внесены следующие изменения. Параллельно с оптопарами подключены светодиоды HL4 – HL9 с токоограничивающими резисторами R10 – R15 номиналом 100 Ом. Параллельное подключение позволяет обеспечить работоспособность цепи оптопары при нарушении целостности цепи светодиодов, а также легкое обнаружение неисправностей сигнального кабеля и самих светодиодов по несоответствию индикации БПИ и КДК. Аналогичным образом реализован вывод сигналов исправности и неисправности весомера – параллельно со светодиодами HL1 – HL2 и резисторами R1 – R2 подключены светодиоды HL10 – HL11 с токоограничивающими резисторами R16 – R17.

В ходе эксплуатации БПИ выявилось несоответствие выходных сигналов сигналам оригинального весомера. Для приведения в соответствие логике работы весомера была проведена корректировка исходного текста программы, позволяющего защитить передаваемое сообщение от опасного искажения – стирания или трансформации единичного разряда.

Листинг 1 – Фрагмент исходного текста программы, отвечающий за вывод откорректированных выходных сигналов

```

vk_0:
ldi r18, 0b00000010 out portb, r18
rjmp lab_c
vk_1:
ldi r18, 0b00100000 out portc, r18
ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
vk_2:
ldi r18, 0b00110000 out portc, r18
ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
vk_3:
ldi r18, 0b00111000 out portc, r18
    
```

```

ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
vk_4:
ldi r18, 0b00111100 out portc, r18
ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
vk_5:
ldi r18, 0b00111110 out portc, r18
ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
vk_6:
ldi r18, 0b00111111 out portc, r18
ldi r21, 0b00000000 out portb, r21
rjmp lab_c
    
```

Откорректированный порядок сигналов позволяет не только легче выявлять отсутствие одного или нескольких сигналов, но и обеспечить избыточность сигнала. В случае отказа одной из сигнальных линий в КГМ будет передана весовая категория на одну ниже измеренной, а не полное отсутствие сигнала. Это позволит уменьшить негативные последствия такого отказа. В таблице 3 приведены исходный и откорректированный выходные сигналы весовой категории блока преобразования интерфейса.

Таблица 3 – Исходный и откорректированный выходные сигналы весовой категории блока преобразования интерфейса

Весовая категория	Выходной сигнал					
	Л	ЛС	С	СТ	Т	ОТ
Л	1	0	0	0	0	0
ЛС	0→1	1	0	0	0	0
С	0→1	0→1	1	0	0	0
СТ	0→1	0→1	0→1	1	0	0
Т	0→1	0→1	0→1	0→1	1	0
ОТ	0→1	0→1	0→1	0→1	0→1	1

Также было выявлено несоответствие, которое заключалось в том, что оригинальный весомер после измерения продолжал выдавать сигналы весовой категории неограниченное время, тогда как КВГ-15 через несколько секунд после измерения прекращает трансляцию результата. При этом БПИ не транслирует сигналы весовой категории, что в некоторых ситуациях, например, при остановке распускаемого состава на измерительном участке, воспринимается управляющей программой КГМ как сбой весомера.

Для исправления данного несоответствия в исходный текст программы внесены изменения, которые заключались в том, что строки с обнулением выходного сигнала вынесены за пределы основного цикла и исполняются только один раз после запуска, что позволяет хранить значение неограниченное время до его изменения.

Листинг 2 – Фрагмент исходного текста программы, отвечающий за обнуление выходного сигнала.

```

ldi r18, 0b00000000 ; очистка порта С
out portc, r18
ldi r18, 0b00000000 ; очистка порта В
out portb, r18
    
```

Алгоритм программного обеспечения преобразователя интерфейсов представлен на рисунке 5. Для написания программы использован ассемблер AVR. Разработка производилась в среде AVR Studio v4.19.

Перед запуском основной программы необходимо инициализировать векторы прерываний, для этого с помощью связки команд `reti ;rjmp` предусматриваются следующие переходы: переход на основную программу, внешнее прерывание 0, внешнее прерывание 1,

совпадение TCNT2 и OCR2, переполнение TCNT2, захват в ICP1, совпадение TCNT1 и OCR1A, совпадение TCNT1 и OCR1B, переполнение TCNT1, переполнение TCNT0, прерывание от модуля SPI, получение байта по USART, опустошение UDR по USART, передача байта по USART, прерывание от АЦП, завершение записи в ЕЕПРОМ, прерывание от компаратора, прерывание от модуля TWI, завершение выполнения SPM.

В блоке инициализации подпрограмм осуществляются подготовка USART к работе и прием 1-го и 2-го байтов в USART.

Выполнение основной программы сводится к инициализации портов в каждой итерации цикла и чтению порта UART. После этого происходит выявление ошибок и определение весовой категории. Об ошибках сигнализирует красный светодиод на печатной плате, а об их отсутствии – зеленый. В зависимости от весовой категории подается сигнал на соответствующий выход устройства.

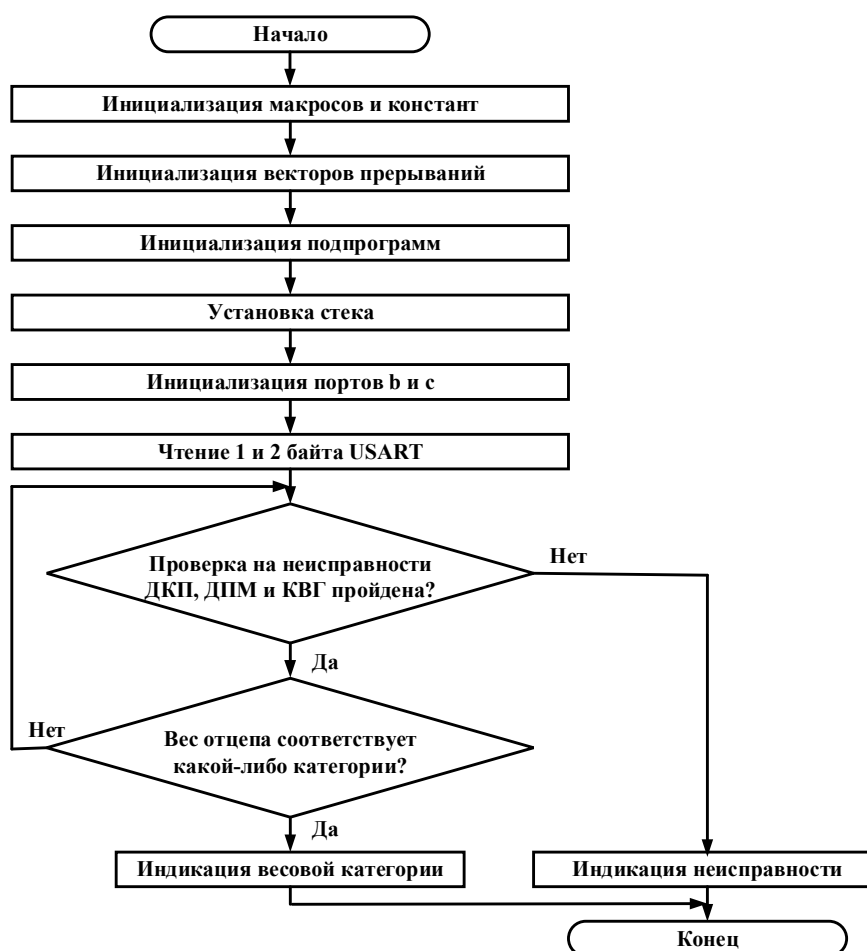


Рисунок 5 – Алгоритм работы программного обеспечения блока преобразователя интерфейса

В статье представлены результаты разработки преобразователя интерфейса для классификатора веса горючего КВГ-15, который предназначен для сопряжения выходного сигнала весомера с блоком ввода информации измерительного участка системы КГМ-ПК. Весомер определяет весовую нагрузку от подвижного состава на рельс в тоннах, а измерительный участок принимает информацию в виде шести дискретных сигналов, соответствующих весовым категориям отцепов. Применение разработанного преобразователя интерфейса позволяет увязать существующее напольное оборудование с постовым, используя современные интерфейсы связи.

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации / Утв. приказом Минтранса РФ от 23.06.2022 № 250. – Москва : ОАО «РЖД», 2022. – 517 с. – Текст : непосредственный.
2. Шабельников, А. Н. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте : монография / А. Н. Шабельников. – Ростов-на-Дону : ВНИИАС МПС [и др.], 2004. – 214 с. – Текст : непосредственный. – EDN QNRUIF.
3. Шабельников, А. Н. Зарубежные системы автоматизации сортировочных горок / А. Н. Шабельников, В. Н. Иванченко. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 1. – С. 30–33. – EDN RZNWWF.
4. Шабельников, А. Н. Зарубежные системы автоматизации сортировочных горок / А. Н. Шабельников, В. Н. Иванченко. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 3. – С. 45–48. – EDN RZNXLZ.
5. Патент на полезную модель № 95623 U1 РФ, МПК В61L 17/00. Комплексная система автоматизации управления сортировочным процессом (КСАУ СП) : № 2010109685/22 : заявлено 15.03.2010 : опубликовано 10.07.2010 / Даньшин А. И., Золотарев Ю. Ф., Одикадзе В. Р., Рогов С. А., Родионов Д. В., Сапков И. Г., Сачко В. И., Соколов В. И., Шабельников А. Н., Шумский А. В. ; заявитель АО «НИИАС». – EDN EQBVMQH.
6. Шабельников, А. Н. Совершенствование системы прицельного торможения отцепов на сортировочных горках / А. Н. Шабельников, В. Р. Одикадзе. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – № 2 (144). – С. 21–23. – EDN IKHYRD.
7. Совершенствование элементной базы устройств АРС сортировочных горок / В. Б. Гуменников, Т. В. Шалаева, Н. И. Харламова, Н. А. Кравцова. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог : матер. междунар. науч.-техн. конф. – Т. 8. – Вып. 227 / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2017. – С. 160–165. – EDN YOJPEN.
8. Патент № 2689668 С1 РФ, МПК В61L 17/00. Способ определения ходовых свойств вагонов для корректировки работы подсистемы автоматического роспуска составов горочного комплекса: № 2018117793 : заявлено 14.05.2018 : опубликовано 28.05.2019 / Лунев С. А., Ходкевич А. Г., Сероштанов С. С., Дремин В. В., Соколов М. М., Горлов А. В. ; заявитель ФГБОУ ОмГУПС. – Текст : непосредственный. – EDN LPSDYL.
9. Ромкина, О. В. Методика управления торможением и регулирование скорости скатывания отцепов / О. В. Ромкина. – Текст : непосредственный // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований : материалы междунар. (заочной) науч.-практ. конф. – Нефтекамск : Мир науки, 2019. – С. 162–170. – EDN UAKMEG.
10. Швалов, Д. В. Определение скорости скатывания отцепов с помощью системы технического зрения / Д. В. Швалов, Г. Д. Дагдьян. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 1. – С. 23–24. – DOI 10.34649/AT.2020.1.1.004. – EDN ВТКАIX.
11. Патент на полезную модель № 66809 U1 РФ, МПК G01G 19/04. Весоизмерительная система : № 2007118068/22 : заявлено 16.05.2007 : опубликовано 27.09.2007 / Дубина А. В., Никифоров Н. А. – Текст : непосредственный. – EDN YRODMA.
12. Авторское свидетельство № 1463603 А1 СССР, МПК В61L 17/00, G01G 19/04. Весомер : № 4161509 : заявлено 15.12.1986 : опубликовано 07.03.1989 / Е. В. Щербаков, В. А. Кобзев, В. И. Мойсеенко ; заявитель Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Текст : непосредственный. – EDN RWSYRS.
13. Никифоров, Н. А. Горочное весомерное устройство УВГ-15 / Н. А. Никифоров, А. В. Дубина, В. В. Захаренко. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 7. – С. 19–21. – EDN JSAMMD.

14. Николаев, А. А. Новые технические средства в системе ГАЦ-АРС / А. А. Николаев, Ю. Б. Степанов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 9. – С. 2–3. – EDN IBNVER.

15. Андронов, Д. В. Второе десятилетие «в автомате» / Д. В. Андронов, М. В. Попков. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 5. – С. 40–42. – EDN MUYYUL.

16. Классификатор веса горочный КВГ-15. – Текст : электронный. – URL: <https://www.memz.org/produkcija-i-uslugi/zhd-dlya-sortirovochnyx-gorok/klassifikator-vesa-gorochnyj-kvg-15> (дата обращения: 03.05.2024).

17. Кодирование информации (двоичные коды) / Н. Т. Березюк, А. Г. Андрущенко [и др.]. – Харьков : Вища школа, 1978. – 252 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Rules for technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 № 250. Moscow, JSC Russian Railways Publ., 2022, 517 p. (In Russian).

2. Shabelnikov A.N. *Intellektualnie sistemi upravleniya na zeleznodoroznom transporte: monografiia* [Intelligent control systems in railway transport: monograph]. Rostov-on-Don: VNIAS MPS Publ., 2004, 214 p. (In Russian).

3. Shabelnikov A.N., Ivanchenko V.N. Foreign automation systems for hump humps. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2014, no. 1, pp. 30-33 (In Russian).

4. Shabelnikov A.N., Ivanchenko V.N. Foreign automation systems for hump humps. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2014, no. 3, pp. 45-48 (In Russian).

5. Danshin A.I., Zolotarev Yu.F., Odikadze V.R., Rogov S.A., Rodionov D.V., Sapkov I.G., Sachko V.I., Sokolov V.I., Shabelnikov A.N., Shumsky A.V. Patent RU № 95623 U1 RF, IPC B61L 17/00, 10.07.2010.

6. Shabelnikov A.N., Odikadze V.R. Improving the system of targeted braking of cuts on hump humps. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2008, no. 2 (144), pp. 21-23 (In Russian).

7. Gumennikov V.B., Shalaeva T.V., Kharlamova N.I., Kravtsova N.A. Improving the element base of ARS devices for hump humps. *Innovatsionnyi transport-2016: spetsializatsiia zheleznykh dorog : materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Innovative transport-2016: specialization of railways: material. international scientific-technical conf. T. 8, Issue. 227]. Ekaterinburg, 2017, pp. 160-165 (In Russian).

8. Lunev S.A., Khodkevich A.G., Seroshtanov S.S., Dremin V.V., Sokolov M.M., Gorlov A.V. Patent RU № 2689668 C1 RF, IPC B61L 17/00, 28.05.2019.

9. Romkina O.V. Methodology for controlling braking and regulating the speed of rolling of cuts. *Nauka, obrazovanie, innovatsii: aprobsatsiia rezul'tatov issledovaniia : materialy mezhdunarodnoi (zaochnoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science, education, innovation: testing of research results: materials of the international. (correspondence) scientific-practical. conf.]. Neftekamsk, World of Science Publ., 2019, pp. 162-170 (In Russian).

10. Shvalov D.V., Dagldiyan G.D. Determination of the speed of rolling of cuts using a technical vision system. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2020, no. 1, pp. 23-24. – DOI 10.34649/AT.2020.1.1.004 (In Russian).

11. Dubina A.V., Nikiforov N.A. Patent RU № 66809 U1 RF, IPC G01G 19/04, 27.09.2007.

12. Shcherbakov E.V., Kobzev V.A., Moiseenko V.I. Copyright certificate № 1463603 A1 USSR, IPC B61L 17/00, G01G 19/04, 07.03.1989.

13. Nikiforov N.A., Dubina A.V., Zakharenko V.V. Hump weighing device UVG-15. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2008, no. 7, pp. 19-21 (In Russian).

14. Nikolaev A.A., Stepanov Yu.B. New technical means in the GAC-ARS system. *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2007, no. 9, pp. 2-3 (In Russian).

15. Andronov D.V., Popkov M.V. The second decade «in the machine». *Avtomatika, sviaz', informatika – Automation, communications, informatics*, 2011, no. 5, pp. 40-42 (In Russian).

16. *Klassifikator vesa gorochnyi KVG-15* [Hunchback weight classifier KVG-15]. Available at: <https://www.memz.org/produkcija-i-uslugi/zhd-dlya-sortirovochnyx-gorok/klassifikator-vesa-gorochnyj-kvg-15> (accessed 03.05.2024).

17. Berezyuk N.T., Andrushchenko A.G., Moshchitsky S.S., Glushkov V.I., Bekesha M.M., Gavrilov V.A. *Kodirovanie informatsii (dvoichnie kodi)* [Information coding (binary codes)]. Kharkov, Vishcha School Publ., 1978, 252 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Пультяков Андрей Владимирович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-51.

E-mail: Pulyakov@irgups.ru

### Скоробогатов Максим Эдуардович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: Skorobogatov\_ME@irgups.ru

### Алексеев Владимир Александрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: bezvoprosov03@mail.ru

### Кузин Максим Витальевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: kuzinmv2000@outlook.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Pulyakov Andrey Vladimirovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department of Automation, Telemechanics and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-51.

E-mail: Pulyakov@irgups.ru

### Skorobogatov Maxim Eduardovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Automation, Telemechanics and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: Skorobogatov\_ME@irgups.ru

### Alekseyenko Vladimir Alexandrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Automation, Telemechanics and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: bezvoprosov03@mail.ru

### Kuzin Maxim Vitalievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the Department of Automation, Telemechanics and Communications, ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

E-mail: kuzinmv2000@outlook.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Преобразователь интерфейса классификатора веса для горочной автоматики / А. В. Пулытков, М. Э. Скоробогатов, В. А. Алексеенко, М. В. Кузин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 2 (58). – С. 146 – 157.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pultyakov A.V., Skorobogatov M.E., Alekseenko V.A., Kuzin M.V. Weight classifier interface converter for hump automation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 2 (58), pp. 146-157 (In Russian).

### Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим научным специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- 2.9.4. Управление процессами перевозок;
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы;
- 2.4.3. Электроэнергетика;
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба» доступны в сети Интернет по адресу: <http://izvestia-transsiba.ru/to-authors/rules-of-submission-of-manuscripts>.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 2 (58) 2024

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» ([www.akc.ru](http://www.akc.ru)) – E28002.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:  
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;  
тел.: +7 (3812) 31-05-54;  
e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 24.06.2024.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 28.06.2024.

