

# ИЗВЕСТИЯ

№ 4(60)

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 (Чжухай, 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 «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПТТРУ, 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 «VNIIZhT» (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 Jiansun** – 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 AЛT of Mukhamedzhan Tyunyshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
  24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Locomotives and locomotive 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

- Расулов М. Х., Машарипов М. Н., Бозоров Р. Ш., Бекжанова С. Е. Аэродинамическое взаимодействие поездов при организации безостановочного скрещения..... 2
- Серяков К. О., Аверков К. В. Исследование динамической нагруженности корпуса и опорных узлов тягового электродвигателя подвижного состава в эксплуатации..... 11
- Кондратьев Ю. В., Классен В. В. О ложных срабатываниях выключателей питающих линий контактной сети постоянного тока при проходе электроподвижным составом изолирующего сопряжения..... 19
- Курилкин Д. Н., Грачев В. В., Базилевский Ф. Ю., Романова А. А., Кириллов Н. В. Расчет актуальной тягово-энергетической характеристики тепловоза по данным системы бортовой диагностики..... 28
- Комяков А. А., Иванченко В. И., Тарасевич В. А., Стасюк А. Н. Разработка физической модели системы тягового электроснабжения переменного тока с управляемым вольтодобавочным трансформатором..... 43
- Галиев И. И., Николаев В. А., Ушак В. Н., Смалев А. Н. Повышение эффективности контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте..... 54

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Буяннэмэх А., Оленев В. А., Каимов Е. В. Вопросы применения интеллектуальной системы управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги..... 63

### Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Сатторов С. Б., Саидивалиев Ш. У. Интегральный подход к управлению железнодорожными узлами с неравномерными потоками..... 79
- Джахьяева С. Б., Климова Е. В. Исследование транспортно-логистической системы транспортировки магистральных труб для нефтепровода..... 87

### Энергетические системы и комплексы

- Тихонов Ф. В. Исследование влияния химического состава ферромагнитных материалов на характеристики асинхронного тягового электродвигателя..... 95
- Полозкова А. П., Гусаров А. С. Исследование режимов работы водяных солнечных коллекторов и повышение эффективности их работы при возникновении стагнации..... 104
- Мятеж Т. В., Донченко С. С., Капустин В. А. Оптимизация режимов работы Новосибирской гидроэлектростанции с учетом влияния Каменской поймы..... 112

### Электротехнические комплексы и системы

- Плешаков А. А. Имитационная модель инверторной системы запуска двигателя тепловоза с учетом параметров дизель-генератора..... 127
- Харламов В. В., Попов Д. И., Кукарекин Е. А. Имитационная модель стенда для испытаний нерегулируемых асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки..... 139

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

М. Х. Расулов<sup>1</sup>, М. Н. Машарипов<sup>1</sup>, Р. Ш. Бозоров<sup>1</sup>, С. Е. Бекжанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан;

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева,  
г. Алматы, Республика Казахстан

## АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЕЗДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОСТАНОВОЧНОГО СКРЕЩЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье приведена методика расчета аэродинамических показателей турбулентного воздушного потока, возникающего в процессе безостановочного скрещения по смежным путям высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» с поездами других категорий. Осуществлен анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований, выполненных в развитых странах мира по определению максимального значения аэродинамического давления, возникающего при безостановочном скрещении высокоскоростных поездов. Анализ показал, что пик аэродинамического давления, который отрицательно влияет на устойчивость подвижного состава, образуется в головной части поездов. Определена функция взаимосвязи множественных переменных для установления природы возникновения, а также расчета значений аэродинамического давления. При этом данная функция учитывает технические характеристики высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob», а также местные условия их эксплуатации.

Целью работы является совершенствование технологии пропуска поездов на высокоскоростных магистралях. Объект работы – участки высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Предметом работы являются методы организации движения поездов различных категорий на высокоскоростных магистралях. Методы: в процессе исследований использованы методы конечных элементов, системного анализа, математического моделирования, «Reynolds averaged Navier-Stoks Method» и  $k-\epsilon$ -модель турбулентного воздушного потока, а также уравнения Навье – Стокса, Эйлера. Область применения результатов: практические рекомендации по применению технологии организации безостановочного скрещения поездов различных категорий можно использовать на высокоскоростных магистралях железнодорожного транспорта. Результаты работы: установлено, что пик аэродинамического давления, возникающего при безостановочном скрещении высокоскоростных пассажирских и грузовых поездов в существующих условиях эксплуатации, находится в пределах допустимых значений, приведенных в Нормативах безопасности на железнодорожном транспорте [14 – 15] при определенных скоростях движения поездов. Выводы: в условиях работы АО «Узбекистон темир йуллари» имеется возможность организации безостановочного скрещения высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» с поездами других категорий.

**Ключевые слова:** высокоскоростной пассажирский поезд, аэродинамика, импульс давления, смешанное движение, безостановочное скрещение, пик давления.

Marufdzhan Kh. Rasulov<sup>1</sup>, Masudzhon N. Masharipov<sup>1</sup>, Ramazon Sh. Bozorov<sup>1</sup>,  
Saule E. Bekzhanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Transport University (TGTrU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan;

<sup>2</sup>Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

## AERODYNAMIC INTERACTION OF TRAINS IN THE ORGANIZATION OF NON-STOP CROSSING

**Abstract.** This article presents a method for calculating the aerodynamic parameters of the turbulent air flow that occurs during the non-stop crossing of high-speed passenger trains “Afrosiyob” with trains of other categories along adjacent tracks. The analysis of the results of analytical and experimental studies carried out in the developed countries of the world to determine the maximum value of aerodynamic pressure arising from non-stop crossing of high-speed trains is carried out. The analysis showed that the peak of aerodynamic pressure, which negatively affects the stability of the rolling stock, is formed in the head of the trains. The function of the relationship of multiple variables is determined to establish the nature of occurrence, as well as to calculate the values of aerodynamic pressure. At the same time, this function takes into account the technical characteristics of “Afrosiyob” high-speed passenger trains, as well as the local conditions of their operation.

**The purpose** of the work is to improve the technology of passing trains on high-speed highways. **The object** of the work is sections of high-speed railway lines.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

The subject of the work is the methods of organizing the movement of trains of various categories on high-speed highways. Methods: in the course of research, finite element methods, system analysis, mathematical modeling, the Reynolds averaged Navier-Stokes Method and the turbulent air flow model, as well as the Navier-Stokes, Euler equations were used. The scope of application of the results: practical recommendations on the application of technology for organizing non-stop crossing of trains of various categories can be used on high-speed railway lines. Results of the work: it was found that the peak of aerodynamic pressure arising from the non-stop crossing of high-speed passenger and freight trains under existing operating conditions is within the permissible values given in the Safety Standards for Railway transport [14 – 15] at certain train speeds. Conclusions: in the working conditions of “Uzbekistan Railways” JSC, it is possible to organize non-stop crossing of high-speed passenger trains “Afrosiyob” with trains of other categories.

**Keywords:** high-speed passenger train, aerodynamics, pressure pulse, mixed motion, non-stop crossing, pressure peak.

По результатам исследований [1 – 4, 8] принято, что при скоростях движения поездов  $V_1 > V_2$  (где  $V_1$  – скорость первого (проходящего) поезда,  $V_2$  – скорость второго (провожающего) поезда) аэродинамическое воздействие первого поезда на второй имеет место, а аэродинамическое воздействие второго поезда на первый отсутствует. При этом можно сделать следующие выводы:

при безостановочном скрещении поездов амплитуда волны аэродинамического давления проходящего поезда не зависит от скорости провожающего поезда, а зависит от собственной скорости движения, геометрического строения лобовой части поезда и величины междупутья;

исследованиями определено, что при одинаковых скоростях движения проходящего и провожающего поездов коэффициент изменения давления увеличивается на 30 – 40 %;

по результатам опытных испытаний определено, что значение аэродинамического давления проходящего поезда на неподвижный ( $V_2 = 0$ ) провожающий подвижной состав несколько выше, чем при  $V_2 > 0$ .

На рисунке 1 показана природа импульса аэродинамического давления, возникающего при безостановочном скрещении поездов.

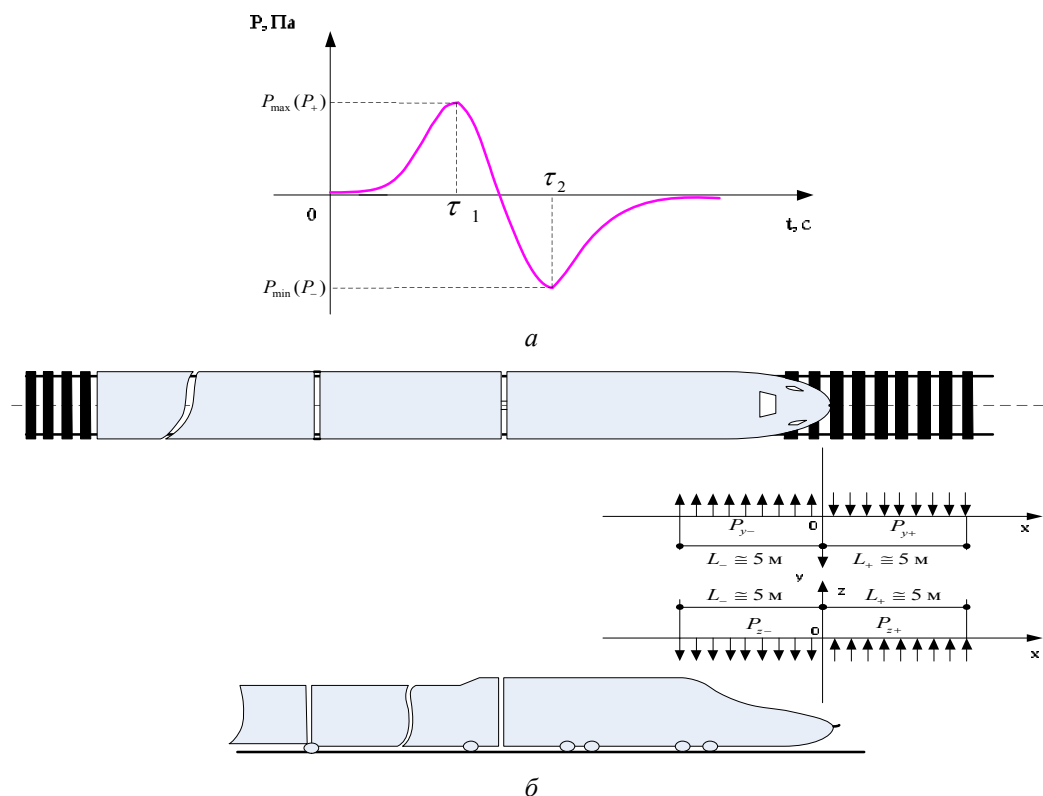


Рисунок 1 – Закономерность изменения импульса аэродинамического давления в зависимости от времени и координаты: а – изменения пика аэродинамического давления в головной части поезда по времени; б – изменения пика аэродинамического давления в головной части поезда в зависимости от координаты

На различные строения, расположенные (вертикально, горизонтально) возле железнодорожного пути, воздействует импульс аэродинамического давления. При этом основной пик импульса аэродинамического давления образуется в головной части поезда. Результаты научных и экспериментальных исследований [5, 6, 13] показали, что если впереди головной части поезда на расстоянии  $3 \div 5$  м наблюдается пик положительного аэродинамического давления, то за момент  $\Delta \tau$  от начала головной части поезда на расстоянии  $3 \div 5$  м – пик отрицательного аэродинамического давления (рисунок 1, б).

Исходя из этого функция зависимости значения аэродинамического давления, образующегося в головной части поезда от многофакторных переменных, имеет вид [7, 8, 10 – 13]:

$$P = P(V, y, z, A, k, \rho, q), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость движения проходящего поезда, км/ч;

$y$  – расстояние между осями смежных путей, м;

$A$  – ширина поезда, м;

$k$  – аэродинамический коэффициент, зависящий от геометрического строения головной части поезда;

$\rho$  – плотность воздуха при нормальной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$q$  – другие переменные.

Максимальное значение аэродинамического давления, образующегося в головной части проходящего поезда, отрицательно влияющего на устойчивость провожающего поезда, находящегося на смежном пути, будет иметь вид:

$$\begin{cases} |P_{y+}^{\max}| = |P_{y-}^{\min}| = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot C_{py} \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2 \\ C_{py} = \frac{S_1}{\left(y - \frac{A}{2} + e_1\right)^2 + c_1} \end{cases} \Rightarrow P_y(V, y, A, k, \rho, q) = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot \left[ \frac{S_1}{\left(y - \frac{A}{2} + e_1\right)^2 + c_1} \right] \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2; \quad (2)$$

$$\begin{cases} |P_{z+}^{\max}| = |P_{z-}^{\min}| = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot C_{pz} \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2 \\ C_{pz} = \frac{S_2}{(z - e_2)^2 + c_2} \end{cases} \Rightarrow P_z(V, z, h, k, \rho, q) = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot \left[ \frac{S_2}{(z - e_2)^2 + c_2} \right] \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2. \quad (3)$$

В исследованиях [4, 8, 13, 15] подробно изучены коэффициенты, приведенные в формулах (2), (3). Однако значения этих коэффициентов существенно различаются в зависимости от геометрических характеристик каждого типа подвижного состава.

На основе результатов научных и экспериментальных исследований [3, 4, 8, 13] установлено, что значение пика аэродинамического давления, возникающего при движении поезда, определяется по формуле:

$$\begin{cases} |P_{y+}^{\max}| = |P_{y-}^{\min}| = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot \left[ \frac{2,5}{\left(y - \frac{A}{2} + 0,25\right)^2} + 0,02 \right] \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2; \\ |P_{z+}^{\max}| = |P_{z-}^{\min}| = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot \left[ \frac{2,0}{(z - 3,10)^2} + 0,015 \right] \cdot \rho \cdot (V/3,6)^2. \end{cases} \quad (4)$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Учитывая геометрические характеристики высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob», получим:

$$\begin{cases} |P_{y+}^{\max}| = |P_{y-}^{\min}| = 0,077 \cdot k_y \cdot \left[ \frac{10}{\left(y - \frac{A}{2} + 0,98\right)^2} + 0,02 \right] \cdot \rho \frac{V^2}{2}; \\ |P_{z+}^{\max}| = |P_{z-}^{\min}| = 0,077 \cdot k_z \cdot \left[ \frac{8,5}{(z - 3,995)^2} + 0,1 \right] \cdot \rho \frac{V^2}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

При организации безостановочного скрещения поездов разных категорий также необходимо учесть аэродинамическое воздействие провожающего (грузового) поезда на высокоскоростной пассажирский поезд. В этих целях произведено моделирование аэродинамических процессов, возникающих при безостановочном скрещении поездов разных категорий, с помощью пакетов прикладных программ Computational fluid dynamics-CFD SOLIDWORKS Flow simulation, SOLIDWORKS Motion, ANSYS Workbench (Fluid Flow (Fluent, CFX)). В процессе моделирования использованы уравнение Навье – Стокса в гидрогазодинамике, а также  $k - \varepsilon$ -модель турбулентного воздушного потока:

$$\begin{cases} \rho \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = X + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \rho \cdot g_x; \\ \rho \cdot \left( \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = Y + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + \rho \cdot g_y; \\ \rho \cdot \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} = Z + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \rho \cdot g_z; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Зависимость кинетической энергии ( $k$ ) и скорости диссипации ( $\varepsilon$ ) воздушного потока выражается в виде:  $\varepsilon = k^{1,5} \cdot L^{-1}$  (турбулентная модель: « $k - \varepsilon$ »). Здесь  $L$  – размеры контуров турбулентного воздушного потока.

Создателями пакета FLUENT предложены выражения для определения кинетической энергии и скорости диссипации турбулентной модели ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \end{cases} \quad (7)$$

На основе гипотезы Буссинеска зависящие от градиента средней скорости турбулентная кинетическая энергия ( $G_k$ ), отталкивающая кинетическая энергия ( $G_b$ ) и коэффициент турбулентный вязкости ( $\mu_t$ ) определяются следующим образом:

$$G_k = \mu_t \cdot S^2; \quad (8)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}; \quad (9)$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

В процессе моделирования были приняты следующие значения коэффициентов:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $C_{3\varepsilon} = 0$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ . Кроме того, в процессе 2D- и 3D-моделирования учтены геометрические характеристики высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» ( $V_1 \leq 250$  км/ч) и грузовых поездов ( $V_2 \leq 70$  км/ч), состоящих из четырехосных универсальных крытых вагонов во главе с электровозом УЗЭЛР. При этом в пространстве вокруг поездов была сформирована сетка, состоящая из тетраэдров и призм, с помощью модуля mesh (метод конечных элементов (МКЭ (FEM))). Также в целях моделирования аэродинамического воздействия поездов в рабочем окне программы ANSYS Fluent Flow были сформированы модули Geometry, Mesh, Setup, Solution и Results. В результате моделирования получены показатели аэродинамических характеристик поездов различных категорий (рисунок 2).

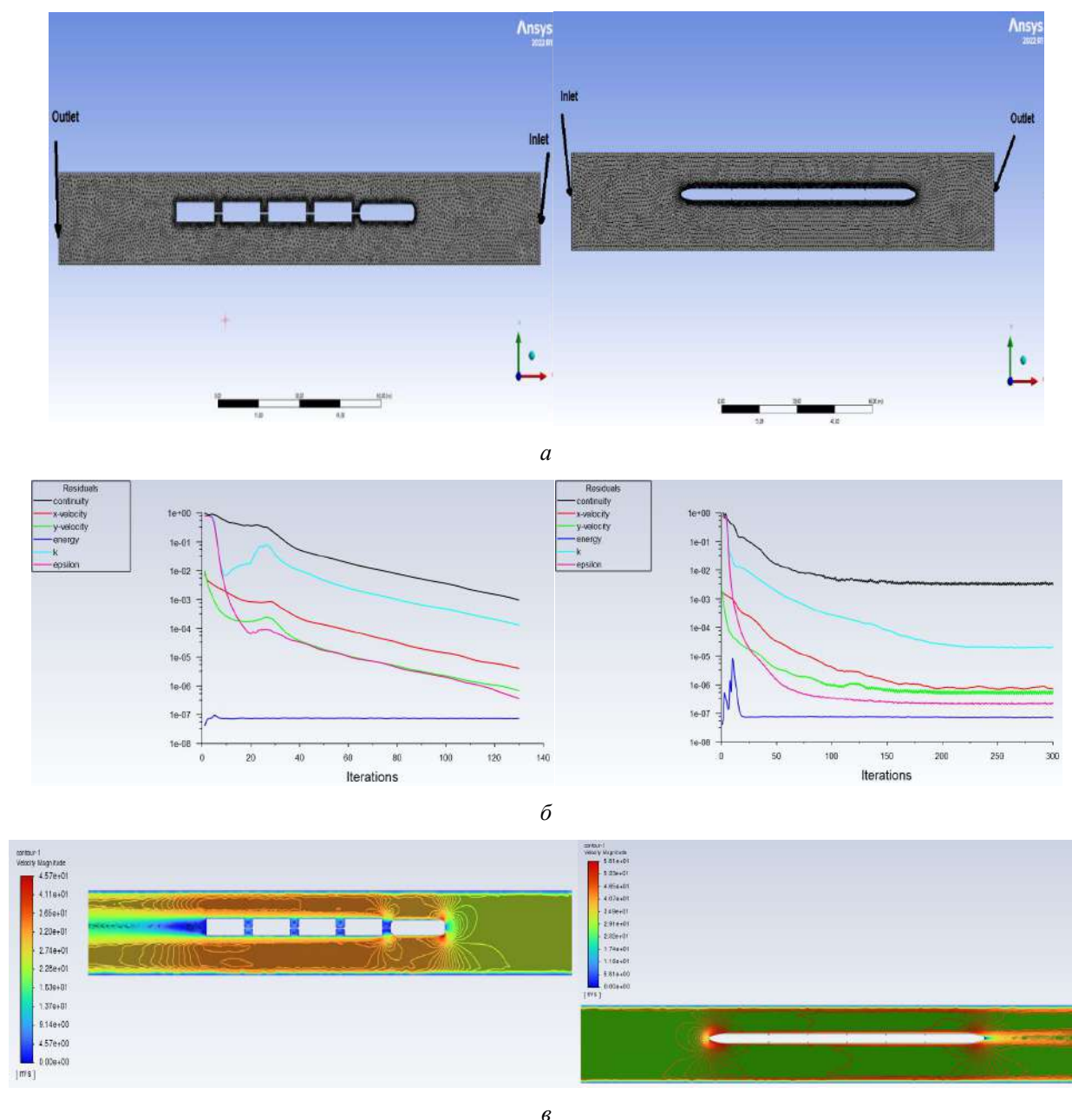
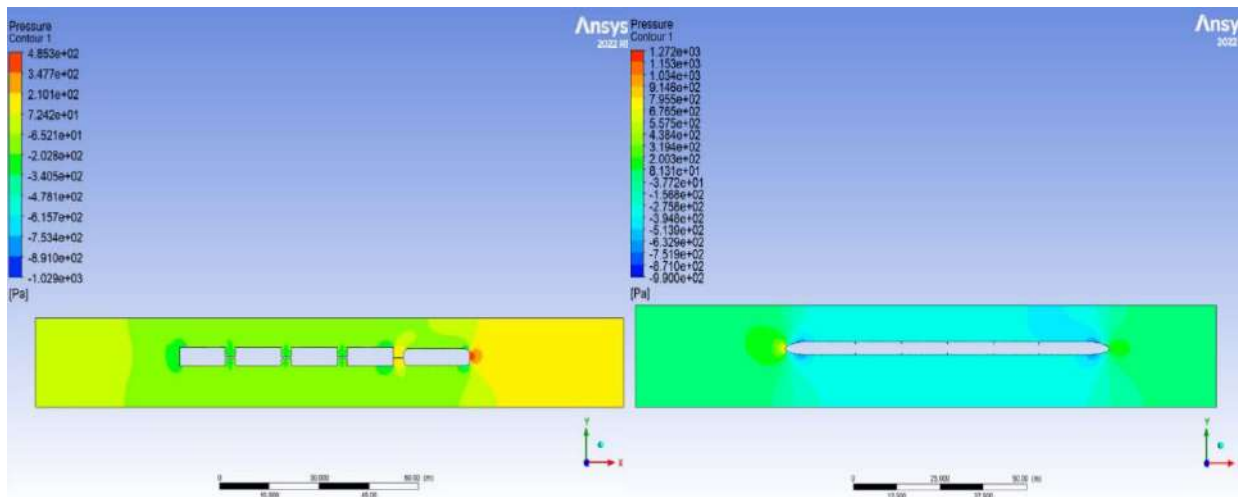
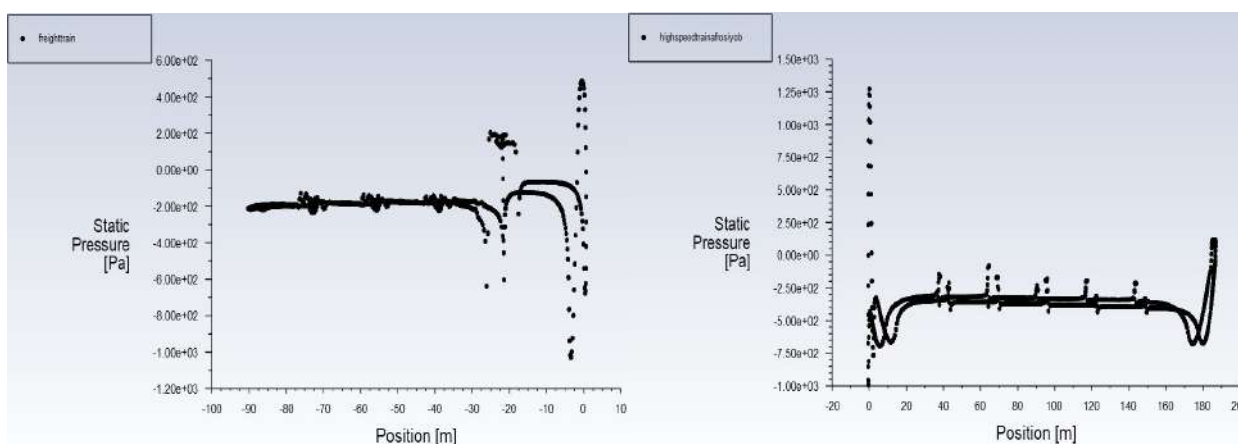


Рисунок 2

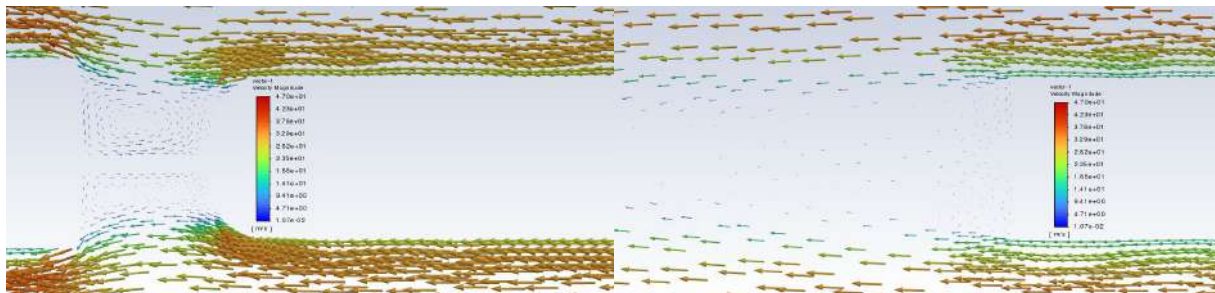
# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



2



д



е

Рисунок 2, лист 2 – Результаты начального этапа процесса моделирования аэродинамического взаимодействия поездов различных категорий с помощью программного пакета ANSYS Fluent Flow:  
а – модуль mesh; б – модули setup и solution; в – модуль results; г – модуль results; д – модуль results; е – модуль results

Как видно из рисунка 2, при организации безостановочного скрещения высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» при скорости движения проходящего поезда 250 км/ч скорости движения провожающего (встречного грузового) поезда 70 км/ч и величине междупутья 4,1 м максимальное значение аэродинамического давления составило 1757,3 Па, что находится в пределах установленного Нормами безопасности на железнодорожном транспорте [14] допустимого значения аэродинамического давления ( $\pm 1800$  Па). Из этого можно сделать вывод о том, что в условиях работы АО «Узбекистон темир йуллари» имеется

возможность организации безостановочного скрещения высокоскоростных пассажирских поездов «Afrosiyob» с поездами других категорий.

## Список литературы

1. Бозоров, Р. Ш. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на встречные поезда / Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2(50). – С. 96–107. – EDN KXSRRB.
2. Бозоров, Р. Ш. Исследование взаимного аэродинамического влияния высокоскоростных пассажирских и грузовых поездов, следующих по смежным путям / Р. Ш. Бозоров, М. Х. Расулов, М. Н. Машарипов. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2022. – № 2 (44). – С. 42–48. – DOI 10.20291/2311-164X-2022-2-42-48. – EDN QXGYGA (на английском языке).
3. EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 2: Aerodynamics on open track, ed: CEN/TC 256, 2013.
4. EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track, ed: CEN/TC 256/ WG 6, 2024.
5. Лазаренко, Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 4. – С. 11–14. – EDN PBEUKJ.
6. Raghunathan, R. S., Kim, H. D., & Setoguchi, T. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace sciences*, 38(6-7), 469-514.
7. Muraki, K., Iwasaki, K., Hoshikawa, T., Oikawa, J. I., Haraguchi, K., & Hayashi, A. (2010). Effect of train draft on platforms and in station houses. *JR East Technical Review*, 16.
8. Baker, C., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., & Sterling, M. (2019). *Train aerodynamics: fundamentals and applications*. Butterworth-Heinemann, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813310-1.00008-3>.
9. Бозоров, Р. Ш. Способы эффективного использования пропускной способности участков в условиях пропуска высокоскоростных пассажирских поездов / Р. Ш. Бозоров, М. Х. Расулов, С. Е. Бекжанова, М. Н. Машарипов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. – 2021. – № 2. – С. 5–22.
10. Rasulov, M., Masharipov, M., Sattorov, S., & Bozorov, R. (2023). Study of specific aspects of calculating the throughput of freight trains on two-track railway sections with mixed traffic. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 458, p. 03015). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345803015>.
11. Marufdjan, R., Masud, M., & Ramazon, B. (2022). Research on the aerodynamics of high-speed trains. *Universum: технические науки*, (6-7 (99)), 30-35. DOI - 10.32743/UniTech.2022.99.6.13827.
12. Rasulov, M., Masharipov, M., Bekzhanova, S. E., & Bozorov, R. (2023). Measures of effective use of the capacity of twotrack sections of JSC “Uzbekistan Railways”. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 05041). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105041>.
13. Zbiec, A. (2021). Aerodynamic Phenomena Caused by the Passage of a Train. Part 2: Pressure Interaction on Passing Trains. *Problemy Kolejnictwa*. Issue 192, pp. 195-202. <http://dx.doi.org/10.36137/1926E>.
14. НБ ЖТ ЦТ 03-98 Нормы безопасности на железнодорожном транспорте. Электропоезда. Нормы безопасности // Информационная сеть «Техэксперт» : сайт. – Текст : электронный. – URL: [kodeks://link/d?nd=456072912](https://kodeks://link/d?nd=456072912) (дата обращения: 02.12.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
15. UIC 566 Leaflet: Loadings of coach bodies and their components, 3<sup>rd</sup> edition of 1.1.90.

1. Bozorov R.Sh. Aerodynamic impact of the high-speed electric train «Afrosiyob» on opposite trains. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 96-107. EDN KXSRRB. (In Russian).
2. Bozorov, R. S., Rasulov, M. X., & Masharipov, M. N. (2022). Investigation of mutual aerodynamic influence of high-speed passenger and freight trains moving on adjacent tracks. *Journal Innотrans Scientific-and-nonfiction edition*, 2(44), 42-48. DOI:10.20291/2311-164X-2022-2-42-48. EDN QXGYGA.
3. EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 2: Aerodynamics on open track, ed: CEN/TC 256, 2010.
4. EN 14067 Railway applications – Aerodynamics – Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track, ed: CEN/TC 256/ WG 6, 2024.
5. Lazarenko Yu.M., Kapuskin A.N. High-speed train "Sapsan"'s aerodynamical action on passengers standing on platform and on oncoming train when crossing. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2012, no. 4, pp.11-14. EDN PBEUKJ. (In Russian).
6. Raghunathan, R. S., Kim, H. D., & Setoguchi, T. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace sciences*, 38(6-7), 469-514.
7. Muraki, K., Iwasaki, K., Hoshikawa, T., Oikawa, J. I., Haraguchi, K., & Hayashi, A. (2010). Effect of train draft on platforms and in station houses. *JR East Technical Review*, 16.
8. Baker, C., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., & Sterling, M. (2019). *Train aerodynamics: fundamentals and applications*. Butterworth-Heinemann, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813310-1.00008-3>.
9. Bozorov R.Sh., Rasulov M.Kh., Bekzhanova S.E., Masharipov M.N. Methods for the efficient use of the capacity of sections in the conditions of the passage of high-speed passenger trains. *Zheleznodorozhnyiy transport: aktualnyie voprosyi i innovaczii – Railway transport: topical issues and innovations*, 2021, no. 2, pp. 5-22. (In Russian).
10. Rasulov, M., Masharipov, M., Sattorov, S., & Bozorov, R. (2023). Study of specific aspects of calculating the throughput of freight trains on two-track railway sections with mixed traffic. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 458, p. 03015). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345803015>.
11. Marufdjan, R., Masud, M., & Ramazon, B. (2022). Research on the aerodynamics of high-speed trains. *Universum: технические науки*, (6-7 (99)), 30-35. DOI - 10.32743/UniTech.2022.99.6.13827.
12. Rasulov, M., Masharipov, M., Bekzhanova, S. E., & Bozorov, R. (2023). Measures of effective use of the capacity of twotrack sections of JSC “Uzbekistan Railways”. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 05041). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340105041>.
13. Zbieć, A. (2021). Aerodynamic Phenomena Caused by the Passage of a Train. Part 2: Pressure Interaction on Passing Trains. *Problemy Kolejnictwa*. Issue 192, pp. 195-202. <http://dx.doi.org/10.36137/1926E>.
14. NB ZhT CzT 03-98 Normy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte. *Elektropoezda. Normyi bezopasnosti* [NB ZhT CT 03-98 Safety standards for railway transport. Electric trains. Safety standards]. Available at: [kodeks://link/d?nd=456072912](https://kodeks://link/d?nd=456072912) (accessed 02.12.2024). Access mode: for authorized users.
15. UIC 566 Leaflet: Loadings of coach bodies and their components, 3<sup>rd</sup> edition of 1.1.90.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Расулов Маруфджан Халикович**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Управление транспортными системами», ТГТрУ.

Тел.: +998 (71) 299-05-10.

E-mail: tashiit\_rektorat@mail.ru

### **Машарипов Масуджон Нумонжонович**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, декан факультета экономики, ТГТрУ.

Тел.: +998 (71) 299-00-11.

E-mail: masudcha@mail.ru

### **Бозоров Рамазон Шамилович**

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

### **Бекжанова Сауле Ертаевна**

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева.

Сатпаева ул., д. 22, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан.

Доктор техн. наук, профессор Казахского национального исследовательского технического университета им. К. И. Сатпаева.

Тел.: +7 (727) 292 60 25.

E-mail: s.bekzhanova@satbayev.university

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аэродинамическое взаимодействие поездов при организации безостановочного скрещения / М. Х. Расулов, М. Н. Машарипов, Р. Ш. Бозоров, С. Е. Бекжанова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 2 – 10.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Rasulov Marufdzhan Khalikovich**

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchilar st., 1, Tashkent City, 100060, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, professor, dean of the faculty of Transport Systems Management, TSTU.

Phone: +998 (71) 299-05-10.

E-mail: tashiit\_rektorat@mail.ru

### **Masharipov Masudzhon Numonzhonovich**

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchilar st., 1, Tashkent City, 100060, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, dean of the Faculty of Economics, TSTU.

Phone: +998 (71) 299-00-11.

E-mail: masudcha@mail.ru

### **Bozorov Ramazon Shamilovich**

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchilar st., 1, Tashkent City, 100060, the Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, senior lecturer of the department of Transport and Cargo Systems, TSTU.

Phone: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

### **Bekzhanova Saule Yertaevna**

Satbayev University (Kazakh National Research Technical University).

22, Satbaev st., Almaty, 050013, The Republic of Kazakhstan.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the Satbayev University.

Phone: +7 (727) 292 60 25.

E-mail: s.bekzhanova@satbayev.university

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rasulov M.Kh., Masharipov M.N., Bozorov R.Sh., Bekzhanova S.Y. Aerodynamic interaction of trains in the organization of non-stop crossing. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 2-10. (In Russian).

К. О. Серяков, К. В. Аверков

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОРПУСА И ОПОРНЫХ УЗЛОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Аннотация.** В данной статье проведен анализ напряженного состояния корпуса и опорных узлов тягового электродвигателя грузовых магистральных электровозов серии 2ЭС6 «Синара». Исследование проводилось с использованием методов математического и компьютерного моделирования. По результатам исследования установлено, что концентраторами напряжений в корпусе тягового электродвигателя являются его опорные узлы, а именно места крепления поводка и моторно-осевых подшипников. Также в ходе исследования напряженного состояния корпуса тягового электродвигателя (ТЭД) установлено, что заложенные прочностные характеристики при проектировании, которые подтверждаются сертификационными стендовыми испытаниями, существенно ниже требуемых прочностных характеристик с учетом внешних силовых воздействий на корпус тягового электродвигателя в эксплуатации. Это обусловливается разницей закладываемых динамических нагрузок при проектировании и особенностей эксплуатации электрической машины. По результатам анализа напряжений тягового электродвигателя ЭДП810 можно сделать вывод о том, что при увеличении скоростей движения в эксплуатации напряжения в конструкции тягового двигателя с опорно-осевым подвешиванием превышают напряжения, предусмотренные при проектировании с учетом требований ГОСТ 2582–2013. При проектировании электрических машин для тягового подвижного состава необходимо учитывать нагрузки, действующие на корпус двигателя и узлы его крепления при прохождении кривых участков пути и импульсных неровностей, так как именно они являются причиной возникновения повышенных напряжений. Применение описанной в статье методики позволяет оценить максимальные напряжения, возникающие в материале корпуса ТЭД, в зависимости от режима работы тягового электродвигателя, скорости движения локомотива и параметров рельсового пути, а также дает возможность выработать рекомендации по совершенствованию системы подвешивания ТЭД для снижения нагрузок на его опорные узлы.

**Ключевые слова:** экипажная часть локомотива, износ, динамика подвижного состава, тяговый электродвигатель, динамические нагрузки, напряженное состояние узлов машин, надежность.

Kirill O. Seryakov, Konstantin V. Averkov

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

## STUDY OF DYNAMIC LOADING OF THE HOUSING AND SUPPORT UNITS OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR OF ROLLING STOCK IN OPERATION

**Abstract.** This article analyzes the stress state of the traction electric motor housing and support units of the freight mainline electric locomotives. The study was conducted using mathematical and computer modeling methods. The study found that the stress concentrators in the traction electric motor housing are its support units, namely the attachment points of the leash and motor-axial bearings. The study also indicates that the design strength characteristics, confirmed by certification bench tests, are lower than the required values, taking into account external force effects on the motor during operation. This is due to differences in the design dynamic loads and operating features of the electric machine.

Analysis of the stresses of the traction electric motor shows that with an increase in the speed of movement during operation, the stresses in the structure of the traction motor with support-axial suspension exceed the calculated values. When designing electric machines for traction rolling stock, it is necessary to take into account the loads on the motor housing and its fastening units when passing curved sections of the track and pulse irregularities, since they cause an increase in stress.

The use of the described method allows us to determine the maximum stresses in the material of the traction electric motor housing depending on the operating mode of the traction electric motor, the speed of the locomotive and the parameters of the track, as well as to develop recommendations for improving the traction electric motor suspension system to reduce the load on its support units.

**Keywords:** locomotive undercarriage, wear, rolling stock dynamics, traction electric motor, dynamic loads, stress state of machine components, reliability.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Динамические силы, возникающие при перемещении локомотива по рельсам, оказывают воздействие на корпус ТЭД и элементы его подвески со стороны колесной пары. Основными факторами возникновения динамических сил являются неравноупругость рельсового пути по протяженности вследствие его неравножесткости в сечениях под шпалами и между ними, геометрические неровности поверхностей катания рельсов; стыковые рельсовые соединения; неравномерный прокат колес по кругу катания и разница диаметров бандажей. Кроме того, большое влияние на нагрузки в опорных узлах ТЭД оказывает движение состава по кривым участкам пути и стрелочным переводам, в результате чего увеличивается рамная сила, создающая дополнительный момент, действующий на поводок и узлы крепления подшипников.

Наибольшие напряжения в опорных узлах тягового электродвигателя возникают при прохождении локомотивом рельсовых стыков. Кроме того, из-за циклического характера изменения напряжений при движении локомотива по стыковым рельсовым путям снижается запас циклической прочности материала. Высокие циклические нагрузки, вызванные движением локомотива в кривых и преодолением геометрических неровностей пути, могут привести к появлению трещин в корпусах моторно-осевых подшипников и обрыву поводка подвешивания тягового электродвигателя.

Сегодня наиболее распространенной проблемой, возникающей в узлах механической части магистральных электропоездов, является образование трещин в опорных точках тяговых электродвигателей, таких как крепежные бобышки и корпуса моторно-осевых подшипников.

В течение срока службы электропоездов серии 2ЭС6 на эксплуатируемом парке Западно-Сибирской дирекции тяги были заварены трещины в корпусах моторно-осевых подшипников 4687 колесных пар [1, 2]. На приписном парке Западно-Сибирской дирекции тяги за 12 месяцев 2023 г. было обнаружено 472 случая появления трещин опорных плит моторно-осевых подшипников (МОПов) (379 – Московка, 93 – Тайга), в 182 случаях была произведена замена колесно-моторных блоков (КМБ), и было обнаружено 138 колесных пар с повторным появлением трещин в этом узле.

Эта ситуация ведет к увеличению количества замен колесно-моторных блоков и истощению переходного запаса линейного оборудования в сервисных локомотивных депо, что негативно сказывается на обслуживании эксплуатируемого парка [3].

В связи с этим для повышения надежности и предотвращения незапланированных ремонтных работ и простоев локомотивов из-за повреждений корпусов тяговых электродвигателей необходимо исследовать напряжения, воздействующие на корпус ТЭД в процессе использования.

В 2018 – 2019 гг. АО «ВНИИЖТ» совместно с АО «Желдорремаш» проводил ходовые динамико-прочностные испытания с целью исследования напряженного состояния корпусов тяговых электродвигателей магистральных грузовых электропоездов [4]. По результатам опытных поездок проведен анализ внешних воздействующих факторов (ВВФ) и возникающего напряженного состояния корпуса тягового электродвигателя.

В результате обработки данных исследований получены значения виброускорений на корпусе тягового двигателя с опорно-осевым подвешиванием. Пиковые значения ускорений, полученные в опытных поездках, указаны в таблице 1. На рисунке 1 представлены данные в виде процессов записи ускорений и вектора суммарных амплитуд ускорений корпуса тягового двигателя.

Таблица 1 – Пиковые значения виброускорений

Номер пикового значения	Время записи	Ось воздействия			Результирующий вектор
		X	Y	Z	
1	6,98708	268,8584	-114,2206	-77,2483	302,1564
2	48,94458	62,9976	-202,7693	-14,5725	212,8296
3	6,98792	178,7734	76,9587	-196,5333	276,6006

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

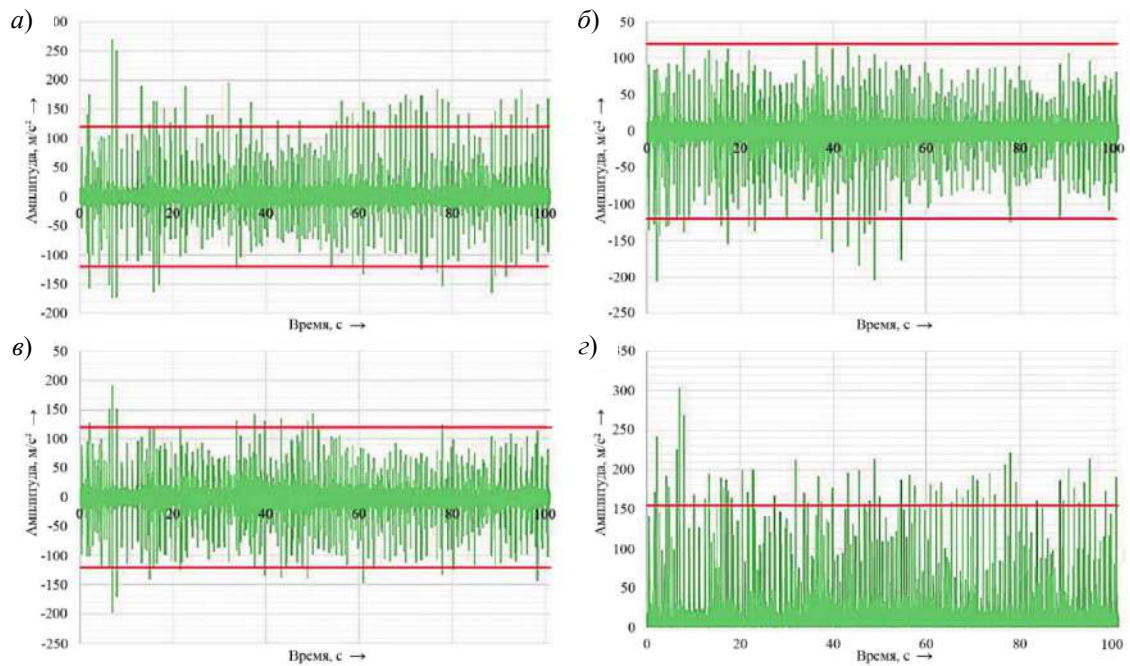


Рисунок 1 – Пример записи ускорения на корпусе тягового двигателя по осям  $Z$  (а),  $Y$  (б),  $X$  (в), где горизонтальными линиями выделено значение, равное  $\pm 120 \text{ м/с}^2$ , а также скалярное значение ускорения результирующего вектора (з), где горизонтальной линией выделено значение, равное  $155 \text{ м/с}^2$

Анализ результатов ходовых динамико-прочностных исследований показал, что виброускорения на тяговом электродвигателе в эксплуатации значительно выше предъявляемых ГОСТ 2582–2013 требований при проведении сертификационных стендовых испытаний. Основная часть силового воздействия формируется от коротких (импульсных) неровностей, таких как стыки рельсового полотна, и может составлять до 41 % напряженного состояния непродессоренной массы экипажной части тягового подвижного состава.

Данные, приведенные на рисунке 1 и в таблице 1, демонстрируют, что пиковые значения ускорений результирующего вектора превышают требования ГОСТ 2582–2013 на 112 %.

Чтобы оценить динамическую нагруженность корпуса тягового электродвигателя и его опорных узлов, необходимо выполнить анализ его напряженного состояния в ходе циклического нагружения при прохождении кривых и при движении по стыковому рельсовому пути. Расчетная схема для оценки напряжений в корпусе ТЭД приведена на рисунке 2.

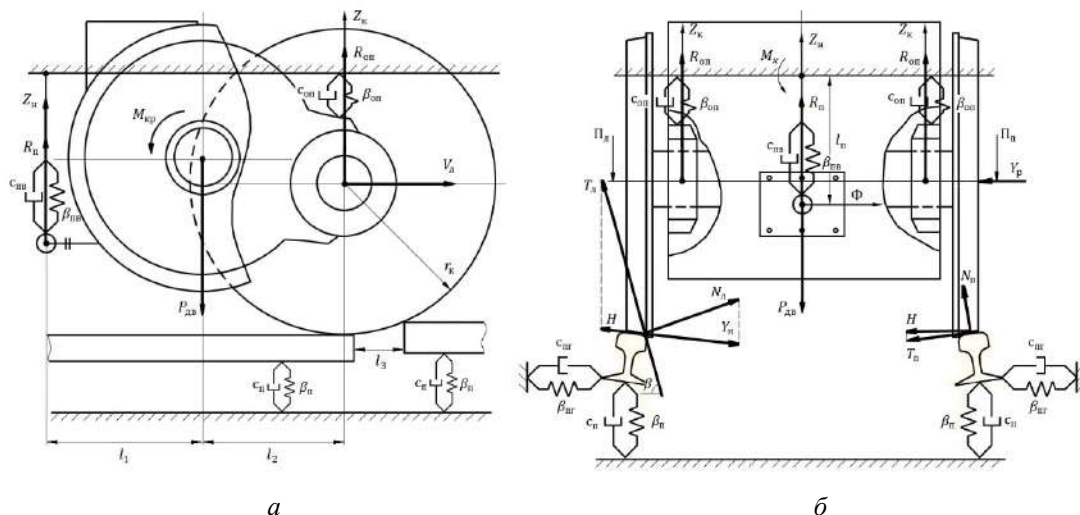


Рисунок 2 – Расчетная схема для оценки вибронгруженности корпуса ТЭД

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Определим силы, действующие на корпус ТЭД и его опорные узлы [5, 6]. Для этого составим уравнения равновесия статических сил в узлах тягового электродвигателя:

$$\begin{cases} R_{\text{п}} + R_{\text{о.п}} = P_{\text{дв}}; \\ R_{\text{п}}(l_1 + l_2) = P_{\text{дв}}l_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{\text{п}}$  – усилие в поводке подвешивания ТЭД;  $R_{\text{о.п}}$  – реакция моторно-осевых подшипников;  $P_{\text{дв}}$  – вес тягового электродвигателя;  $l_1$  – плечо от точки подвешивания тягового электродвигателя к раме тележки до оси вращения якоря ТЭД;  $l_2$  – плечо от оси вращения якоря ТЭД до оси колесной пары.

Из уравнения (1) получаем:

$$R_{\text{п}} = \frac{P_{\text{дв}}l_2}{l_1 + l_2}; \quad (2)$$

$$R_{\text{о.п}} = \frac{P_{\text{дв}}l_1}{l_1 + l_2}. \quad (3)$$

Центробежная сила, действующая на экипажную часть локомотива во время движения по кривому участку пути, определяется по выражению:

$$\Phi = \frac{m_{\text{т}}V_{\text{л}}^2}{r_{\text{кр}}} \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $m_{\text{т}}$  – масса тележки;  $V_{\text{л}}$  – скорость локомотива;  $r_{\text{кр}}$  – радиус кривой;  $\alpha$  – угол возвышения наружного рельса.

Момент, действующий на узел крепления поводка к корпусу тягового электродвигателя, определяется по выражению:

$$M_x = \Phi k_{\text{д}} l_{\text{п}}, \quad (5)$$

где  $k_{\text{д}}$  – коэффициент динамики;  $l_{\text{п}}$  – длина поводка подвешивания ТЭД.

При движении локомотива колеса тележек своими гребнями набегают на боковые грани головок рельсов. В точке их контакта возникает нормальная сила реакции  $N$  (рисунок 3).

Вертикальная составляющая  $B$  нормальной силы реакции стремится вынудить вращающееся колесо перемещаться вверх по боковой поверхности рельса, а горизонтальная составляющая  $Y_{\text{н}}$  (направляющая сила) направляет экипаж в рельсовой колее, причем

$$N = \frac{1}{\sin \beta} Y_{\text{н}}, \quad B = \text{ctg} \beta Y_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол наклона образующей гребня бандажа.

Под действием силы  $\Pi_{\text{л}}$  (рисунок 2) левое колесо стремится соскользнуть вниз, однако этому препятствует сила трения  $T = \mu_{\text{тр}} N$ , где  $\mu_{\text{тр}}$  – коэффициент трения скольжения.

Составляющие силы трения:

$$T_{\text{в}} = T \sin \beta = \mu_{\text{тр}} Y_{\text{н}}; \quad (7)$$

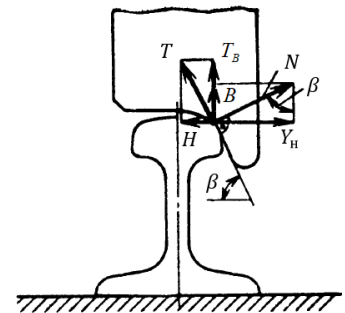


Рисунок 3 – Силы, действующие в точке контакта колеса и рельса

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$H = T \cos \beta = \mu_{\text{тр}} \text{ctg} \beta Y_{\text{н}}. \quad (8)$$

Кроме направляющей силы  $Y_{\text{н}}$ , приложенной к гребню бандажа, на колесную пару действует еще реакция рамы  $Y_{\text{р}}$  – рамная сила. Горизонтальную реакцию колеса на рельс называют боковой силой  $Y_{\text{б}}$ . Согласно рисунку 2 при набегании левого колеса на рельс во время движения по кривому участку пути

$$Y_{\text{р}} = Y_{\text{н}} - 2H; \quad Y_{\text{б}} = Y_{\text{н}} - H; \quad Y_{\text{п}} = Y_{\text{б}} - H. \quad (9)$$

Для анализа распределения напряжений в корпусе тягового электродвигателя ЭДП810 была разработана его геометрическая модель (рисунок 4).

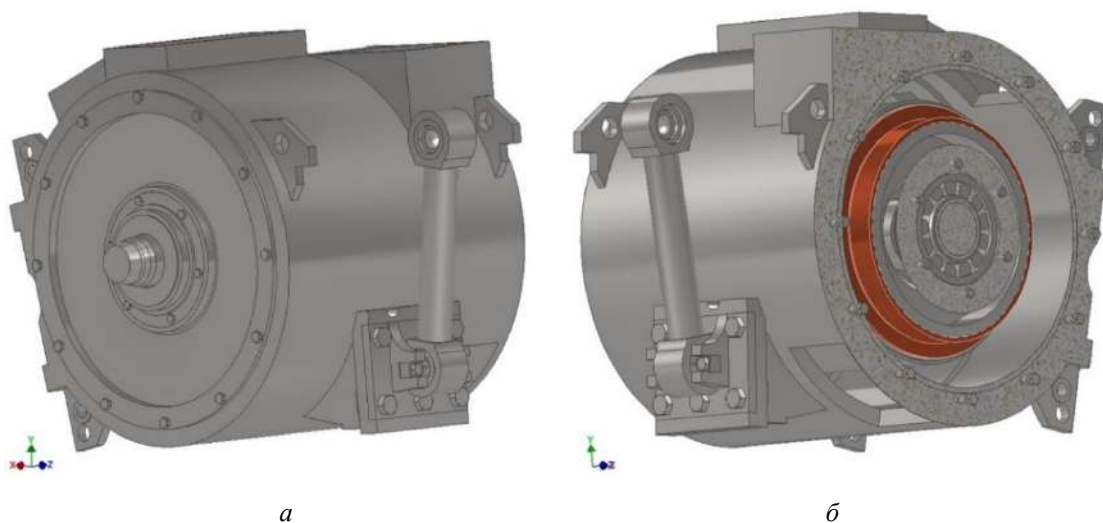


Рисунок 4 – Геометрическая модель тягового электродвигателя ЭДП810

В результате исследования напряженного состояния корпуса тягового электродвигателя ЭДП810 с учетом рассмотренных выше динамических нагрузок установлена картина распределения напряжений в материале корпуса ТЭД (рисунок 5).

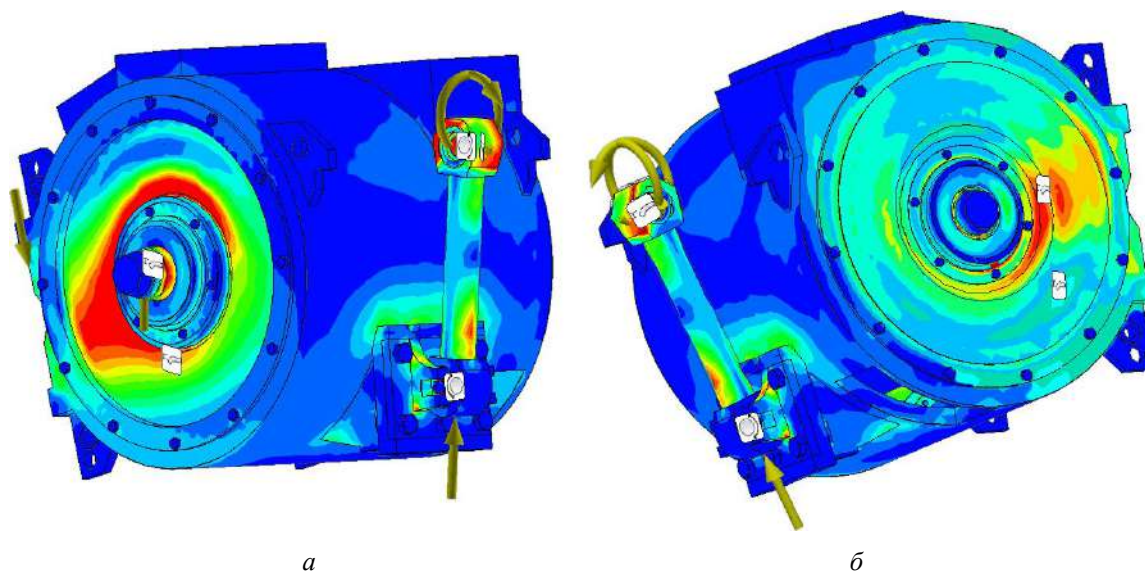


Рисунок 5 – Распределение напряжений в корпусе тягового электродвигателя ЭДП810

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Полученные данные показывают, что концентраторами напряжений в корпусе тягового электродвигателя являются его опорные узлы, а именно места крепления поводка и моторно-осевых подшипников. Результаты моделирования подтверждают статистические данные отказов тяговых электродвигателей по причине появления трещин в корпусе [1, 7].

В результате исследования напряженного состояния корпуса ТЭД установлено, что заложенные при проектировании прочностные характеристики, которые подтверждаются сертификационными стендовыми испытаниями, существенно ниже требуемых прочностных характеристик с учетом внешних силовых воздействий на корпус тягового электродвигателя в эксплуатации. Это обуславливается разницей закладываемых ВВФ при проектировании и особенностей эксплуатации электрической машины.

Полученные расчетным путем напряжения рассматриваются в контрольных точках, которые показаны на рисунке 6. В таблице 2 указаны значения напряжений в контрольных точках корпуса тягового электродвигателя, возникающие под действием стандартизированных нагрузок и нагрузок, действующих во время эксплуатации при различных скоростях движения.

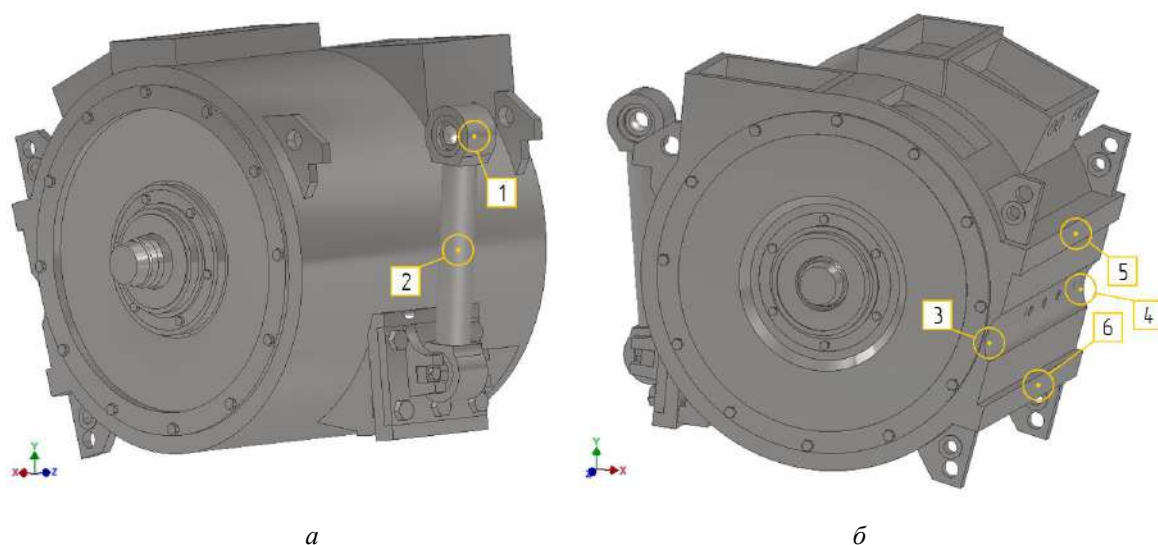


Рисунок 6 – Контрольные точки, расположенные на двигателе ЭДП810:

1, 2 – поводок; 3, 4 – моторно-якорные подшипники; 5, 6 – верхние и нижние кронштейны

Таблица 2 – Напряжение в контрольных точках тягового электродвигателя

Номер контрольной зоны	Напряжение, МПа			
	проектный расчет в соответствии с ГОСТ 2582–2013	воздействие эксплуатационных нагрузок (V = 50 км/ч)	воздействие эксплуатационных нагрузок (V = 70 км/ч)	воздействие эксплуатационных нагрузок (V = 80 км/ч)
1	211	194	266	311
2	207	178	236	276
3	225	203	272	314
4	221	201	268	312
5	214	184	231	272
6	206	180	229	266

По результатам анализа напряжений тягового электродвигателя ЭДП810 можно сделать вывод о том, что при увеличении скоростей движения в эксплуатации напряжения в конструкции тягового двигателя с опорно-осевым подвешиванием превышают напряжения, предусмотренные при проектировании с учетом требований ГОСТ 2582–2013.

При проектировании электрических машин для тягового подвижного состава необходимо учитывать нагрузки, действующие на корпус двигателя и узлы его крепления при прохожде-

нии кривых участков пути и импульсных неровностей, так как именно они являются причиной возникновения повышенных напряжений.

Применение описанной в статье методики позволяет оценить максимальные напряжения, возникающие в материале корпуса ТЭД, в зависимости от режима работы тягового электродвигателя, скорости движения локомотива и параметров рельсового пути, а также дает возможность выработать рекомендации по совершенствованию системы подвешивания ТЭД для снижения нагрузок на его опорные узлы.

## Список литературы

1. Николаев, В. А. Проблема прочности узлов опирания тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 / В. А. Николаев, В. А. Нехаев, К. О. Серяков. – Текст : непосредственный // Сборник статей VIII международной конференции по проблеме механики современных машин / Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. – Улан-Удэ, 2022. – С. 548–553. – EDN ATBNPA.

2. Галиев, И. И. Анализ отказов узлов экипажной части магистральных электровозов / И. И. Галиев, В. А. Николаев, К. О. Серяков. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23) : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 5–11. – EDN EWMCSSH.

3. Волков, А. Н. Устройство и ремонт электровоза 2ЭС6 «Синара» / А. Н. Волков. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2020. – 680 с. – Текст : непосредственный. – EDN NIGQYU.

4. Буханцев, А. А. Исследование вибронгруженности неподрессоренной массы тягового электродвигателя подвижного состава в эксплуатации / А. А. Буханцев, В. В. Жавыркин, К. В. Колесников. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2021. – С. 5–12. – EDN YDLBEV.

5. Механическая часть подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под общей редакцией И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.

6. Шантаренко, С. Г. Математическое моделирование напряженного состояния поводка подвески тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6 / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрасов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 2 (58). – С. 46–51. – EDN UCQZFFV.

7. Ахмадеев, С. Б. Анализ повреждений механической части электровозов нового поколения в эксплуатации (на примере 2ЭС6) / С. Б. Ахмадеев, А. М. Корнев. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием : в 3 частях / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч. 1. – С. 203–208. – EDN UZRRYV.

## References

1. Nikolaev V.A. [The problem of strength of support units of traction electric motors of the 2ES6 electric locomotive]. *VIII mezhdunarodnaya konferenciya problemy mekhaniki sovremennyh mashin : Sbornik statej konferencii* [VIII International Conference Problems of Mechanics of Modern Machines: Conference Papers Collection]. Ulan-Ude, 2022, pp. 548-553. EDN ATBNPA. (In Russian).

2. Galiev I.I., Nikolaev V.A., Seryakov K.O. [Analysis of failures of the undercarriage units of mainline electric locomotives]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (Remont i Dinamika'23) : Materialy*

*vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Technological support for repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock (Repair and Dynamics'23): Proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference with international participation]. Omsk, 2023, pp. 5-11. EDN EWMCSH. (In Russian).

3. Volkov A.N. *Ustrojstvo i remont elektrovoza 2ES6 «Sinara»* [Construction and repair of electric locomotive 2ES6 «Sinara»]. Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2020, 680 p. EDN NIGQYU. (In Russian).

4. Buhancev A.A., Zhavyrkin V.V., Kolesnikov K.V. [Study of vibration loading of unsprung mass of traction electric motor of rolling stock in operation]. *Ekspluatacionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov : Materialy VI vserossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem* [Operational reliability of locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction : Proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference with international participation]. Omsk, 2021, pp. 5-12. EDN YDLBEV. (In Russian).

5. Biryukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P. *Mekhanicheskaya chast' podvizhnogo sostava* [Mechanical part of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992, 440 p. (In Russian).

6. Shantarenko S.G., Kuznecov V.F., Yurasov O.D. Mathematical modeling of the stress state of the suspension rod of the traction electric motor of the 2ES6 electric locomotive. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2015, no. 2 (58), pp. 46-51. EDN UCQZV. (In Russian).

7. Ahmadeev S.B., Kornev A.M. [Analysis of damage to the mechanical part of new generation electric locomotives in operation (using 2ES6 as an example)]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: materialy III Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem : v 3 chastyah* [Technological support for repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock: materials of the III All-Russian scientific and technical conference with international participation: in 3 parts]. Omsk, 2015, vol. 1, pp. 203-208. EDN UZRRYV. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Серяков Кирилл Олегович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: kirillseryakov@gmail.com

### Аверков Константин Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: averok@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Серяков, К. О. Исследование динамической нагруженности корпуса и опорных узлов тягового электродвигателя подвижного состава в эксплуатации / К. О. Серяков, К. В. Аверков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 11 – 18.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Seryakov Kirill Olegovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Theoretical and Applied Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: kirillseryakov@gmail.com

### Averkov Konstantin Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport Engineering and Rolling Stock Repair Technologies», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-18.

E-mail: averok@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Seryakov K.O., Averkov K.V. Study of dynamic loading of the housing and support units of the traction electric motor of rolling stock in operation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 11-18. (In Russian).

Ю. В. Кондратьев, В. В. Классен

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

## О ЛОЖНЫХ СРАБАТЫВАНИЯХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПРОХОДЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ИЗОЛИРУЮЩЕГО СОПРЯЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос возникновения ложных срабатываний быстродействующих выключателей питающих линий контактной сети постоянного тока. При проходе токоприемником изолирующего сопряжения возникает режим перераспределения тока, потребляемого электроподвижным составом, между двумя питающими линиями контактной сети. Такой процесс сопровождается бросками тока на быстродействующих выключателях питающих линий и может вызывать их отключение из-за ложной работы защиты. Определены причины отключений, заключающиеся в особенности защитных характеристик применяемых выключателей. Рассмотрены существующие организационные и технические мероприятия по снижению числа ложных отключений и устройства, минимизирующие последствия уже возникшей дуги. Выполнена оценка их эффективности. Определена основная задача исследования, заключающаяся в поиске современного решения проблемы возникновения ложных отключений в условиях скоростного и тяжеловесного движения. Приведена характеристика срабатывания выключателя с индуктивным шунтом или защитным реле, на которых реализована основная защита выключателей, при определенной постоянной времени цепи. Проведен анализ осциллограмм отключений выключателей 3,3 кВ присоединений контактной сети тяговой подстанции Углерод Западно-Сибирской железной дороги, питающих сбегавшую и набегавшую ветви изолирующего сопряжения при проходе токоприемника электроподвижного состава под током. Выявлены их характерные особенности – отсутствие скачков напряжения в момент замыкания обеих ветвей изолирующего сопряжения, а также относительно низкая по сравнению с аварийными режимами скорость нарастания величины тока. Выявлены особенности прохода локомотивов при отсутствии и наличии тока нагрузки в питающей линии набегавшей ветви, а также при проходе соединенных поездов и поездов с кратной тягой. Анализ осциллограмм показал, что современные устройства защит достаточно достоверно регистрируют данные процессы. Поэтому решаемая задача исключения ложных отключений сводится к поиску параметров, на основании которых цифровой терминал будет блокировать работу основной защиты выключателя.

**Ключевые слова:** быстродействующий выключатель, ложные отключения, изолирующее сопряжение, цифровой терминал защит, сбегавшая ветвь, набегавшая ветвь.

Yuri V. Kondratiev, Vladimir V. Klassen

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

## ABOUT THE DC CONTACT NETWORK SUPPLY LINES SWITCHES FALSE TRIGGERINGS DURING THE INSULATING CONNECTION PASSAGE BY ELECTRIC ROLLING STOCK

**Abstract.** The article considers the issue of the occurrence of false alarms of high-speed switches of the supply lines of the DC contact network. When the current collector passes the insulating interface, a mode of redistribution of the current consumed by the electric rolling stock occurs between the two supply lines of the contact network. This process is accompanied by surges of current on the high-speed switches of the supply lines and can cause them to turn off due to false protection operation. The reasons for the outages are determined, which consist in the features of the protective characteristics of the switches used. The existing organizational and technical measures to reduce the number of false shutdowns and devices that minimize the consequences of an arc that has already occurred are considered. An assessment of their effectiveness has been carried out. The main task of the study is to find a modern solution to the problem of false disconnections in conditions of high-speed and heavy traffic. The characteristic of the operation of a switch with an inductive shunt or a protective relay, on which the main protection of the switches is implemented, is given at a certain time constant of the circuit. The analysis of oscillograms of disconnections of 3.3 kV switches of the connections of the contact network of the Uglerod traction substation of the West Siberian Railway. Their characteristic features are revealed – the absence of voltage surges at the moment of closure of both branches of the insulating interface, as well as a relatively low rate of increase in current value compared to emergency modes. The features of the passage of locomotives in the absence and presence of load current in the supply line of the incoming branch, as well as during the passage of connected trains and trains with multiple traction, are revealed. The analysis of the waveforms showed that modern protection devices reliably record these processes. Therefore, the solved task of eliminating false disconnections is reduced to finding parameters based on which the digital terminal will block the operation of the main protection of the switch.

**Keywords:** high-speed switch, false disconnections, isolating interface, digital protection terminal, escaping branch, oncoming branch.

Известно, что одной из проблем в эксплуатации тяговой сети постоянного тока является наличие ложных отключений быстродействующих выключателей (БВ) питающих линий контактной сети (ПЛКС) при проходе токоприемников электроподвижного состава (ЭПС) изолирующих сопряжений (ИС) под током.

В соответствии с протоколом № 5 заседания секции «Электрификация и электроснабжение» Научно-технического совета ОАО «РЖД» от 25.05.2023, утвержденным директором ОАО «РЖД» по энергетическому комплексу – начальником Трансэнерго, определены основные задачи, требующие решения в железнодорожном электроснабжении. Одной из основных задач является исключение ложных срабатываний быстродействующих выключателей при проходе токоприемников электроподвижного состава изолирующих сопряжений на контактной сети постоянного тока [1].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема ИС (а) и процессы изменения токов смежных питающих линий при проходе ЭПС под током (б).

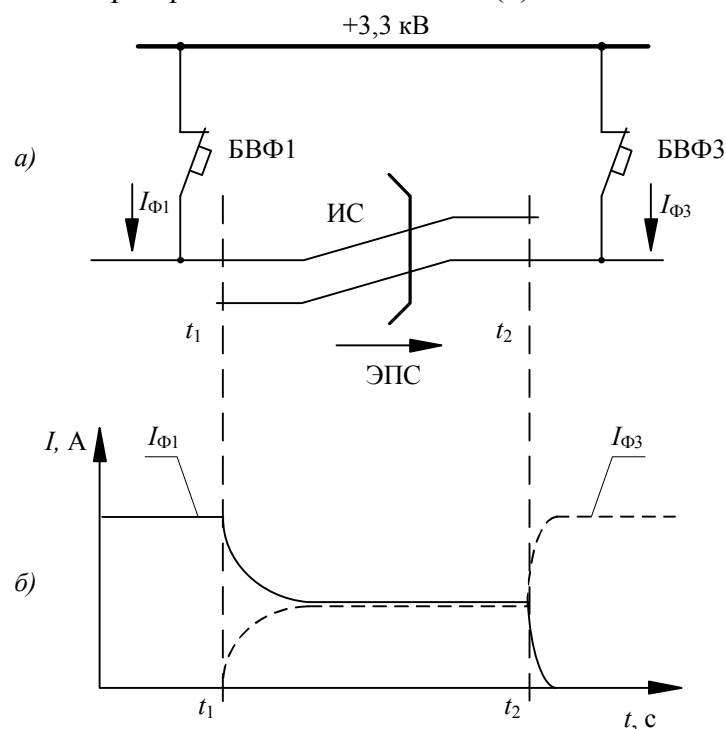


Рисунок 1 – Принципиальная схема ИС (а) и процессы изменения токов смежных питающих линий при проходе по нему ЭПС под током при отсутствии нагрузки на присоединении набегающей ветви (б): ИС – изолирующее сопряжение; ЭПС – электроподвижной состав;  $I_{\Phi 1}$ ,  $I_{\Phi 3}$  – токи питающих линий Ф1 и Ф3; БВФ1, БВФ3 – БВ питающих линий Ф1 и Ф3

При проходе ЭПС изолирующего сопряжения возникает режим перераспределения тока, потребляемого электроподвижным составом, между двумя линиями контактной сети, питающими ветвь, с которой он съезжает (далее – «сбегающая» ветвь) и ветвь, на которую он переходит (далее – «набегающая» ветвь) [2]. Момент времени  $t_1$  соответствует перекрытию ветвей ИС токоприемником ЭПС,  $t_2$  – сходу токоприемника ЭПС с ИС. Такой процесс сопровождается бросками тока на быстродействующих выключателях ПЛКС и может вызывать их отключение из-за ложной работы защиты ввиду ее специфических характеристик. Устройство, выполняющее функцию защиты, представляет собой либо встроенный в конструкцию выключателя индуктивный шунт (для старых выключателей типов АБ-2/4, ВАБ-28, ВАБ-43) или выносное реле-дифференциальный шунт (РДШ), устанавливаемое в разрыв «+» шины 3,3 кВ после выключателя (для выключателей типов ВАБ-49, ВАБ-77, ВАБ-206).

Эти устройства выполняют функцию максимально-импульсной токовой защиты (МИЗ), являющейся основной для БВ ПЛКС [3], которая реагирует на приращения величины тока.

Отключение выключателя приводит к появлению дуги между токоприемником и сбегавшей ветвью ИС, оставшейся под напряжением, в момент  $t_2$ , что влечет за собой пережог контактного провода. Необходимо отметить, что дуга горит стабильно, так как поддерживается большой индуктивностью контура, включающего индуктивности первичной питающей сети, тяговой подстанции (ТПС), питающего присоединения контактной сети и линии отсоса с реактором сглаживающего устройства [4].

Существует несколько организационных и технических мероприятий, направленных как на исключение ложных отключений выключателей, так и на «перехват» уже возникшей дуги.

Так, например, для предупреждения дугового перекрытия секционного изолятора введена специальная сигнализация, оповещающая машиниста о необходимости опустить токоприемник перед въездом на ИС.

Для «перехвата» дуги ЦНИИ МПС разработано несколько видов защит контактных проводов от пережогов, представляющих собой металлические конструкции различного вида, навешиваемые на провода ветвей ИС.

Для ликвидации последствий ложных отключений ПЛКС применялось мгновенное автоматическое повторное включение (МАПВ) быстродействующего выключателя, отключавшегося при проходе ЭПС [5, 6], что позволило значительно уменьшить число пережогов контактного провода.

Для снижения числа ложных отключений предложено применение блокировки защит ПЛКС в момент прохода токоприемником изолирующего сопряжения [4, 6]. Один из вариантов такого решения – устройство блокировки выключателей смежных присоединений (УБВСФ), предложенное и описанное в диссертации [4]. Также предложено применять изолирующее сопряжение с резистивным переводом тока без блокировки защит присоединений контактной сети для осуществления плавной передачи тока с фидера на фидер, исключающей появление резких скачков тока в момент касания токоприемником обеих ветвей ИС.

Еще один способ снижения числа ложных отключений выключателей при проходе ИС, описанный в диссертации [2], разработан и опробован на Западно-Сибирской железной дороге. Способ заключался в применении РДШ с временной задержкой его срабатывания за счет полного снятия пакета стали на ветви меньшего сечения, что позволило значительно уменьшить количество ложных отключений. Также были разработаны практические рекомендации по выбору уставок устройств защит контактной сети постоянного тока при применении РДШ с выдержкой времени его срабатывания совместно с цифровыми терминалами защит контактной сети типа ИнТер-3,3 (ЦЗАФ-3,3).

Все предложенные решения в разной степени снижают вероятность ложных отключений БВ или пережога контактного провода, однако не нашли массового применения, так как имеют следующие недостатки:

- усложнение конструкции ИС и защит контактной сети;
- увеличение эксплуатационных затрат на устройства защит контактной сети;
- большой сосредоточенный вес навешиваемых на ветви ИС конструкций, снижающий эластичность контактной сети;
- снижение эффективности применения перечисленных устройств и методов ввиду увеличения скоростей и масс ЭПС, а также ограничения в их применении на участках со сложным профилем пути.

Поэтому возникает необходимость в поиске нового современного решения проблемы возникновения ложных отключений, которое будет эффективно в условиях скоростного и тяжеловесного движения поездов.

Для решения поставленной задачи необходимо охарактеризовать условия работы защит быстродействующих выключателей в системе тягового электроснабжения постоянного тока.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Система тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока относится к активно-индуктивным цепям, для которых свойственно экспоненциальное приращение тока (рисунок 2, а). Поэтому характеристики срабатывания быстродействующих выключателей, реагирующих на величину тока и его броски, необходимо рассматривать при таких приращениях.

Характеристика срабатывания выключателя с индуктивным шунтом (защитным реле) при постоянной времени цепи  $\tau_1$  представлена на рисунке 2, б. Из данной характеристики видно, что чем больше значение установившегося тока в цепи  $I_1$  при некоторой постоянной времени  $\tau_1$ , тем меньше приращение тока  $\Delta I_1$  необходимо для срабатывания выключателя [4].

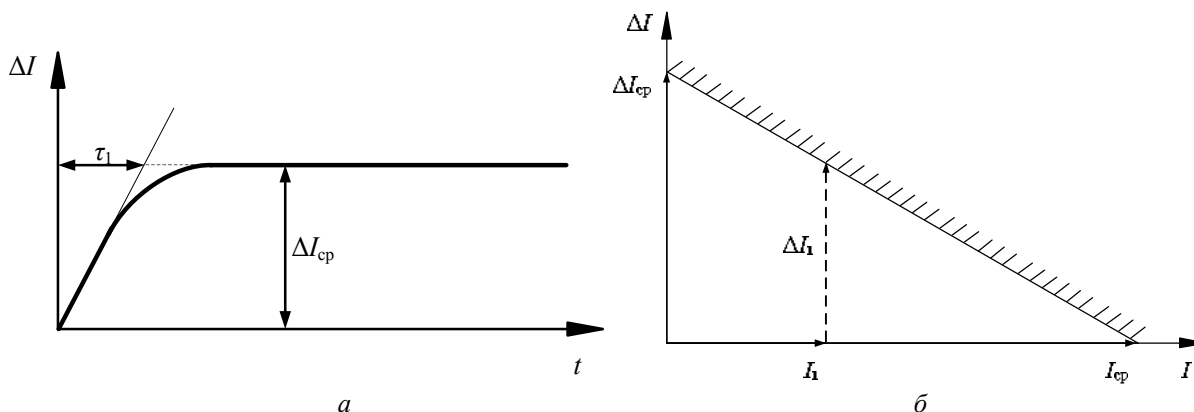


Рисунок 2 – Экспоненциальное приращение тока в тяговой сети (а) и характеристика срабатывания выключателя с индуктивным шунтом или защитным реле при постоянной времени цепи  $\tau_1$  (б)

Отсюда можно сделать вывод о том, что при наличии тока нагрузки в набегающей ветви в момент перекрытия токоприемником ветвей ИС вероятность отключения БВ набегающего присоединения возрастает.

Наличие тока в набегающей ветви характерно для пакетного пропуска поездов, когда локомотив одного состава еще не перешел на соседнюю межподстанционную зону (МПЗ), а следующий за ним уже замкнул ветви ИС рассматриваемой станции. Однако наиболее худшие условия в таком случае возникают при прохождении по изолирующему сопряжению соединенного поезда, когда расстояние между токоприемниками локомотивов одного ЭПС составляет 600 – 700 м, а токоприемник первого по ходу движения электровоза полностью перешел на набегающую ветвь и потребляет ток нагрузки с присоединения контактной сети, питающего набегающую ветвь (рисунок 3).

Отдельно стоит отметить проход ИС поездом с кратной тягой, когда расстояние между токоприемниками локомотивов составу составляет 30 – 40 м при длине изолирующего сопряжения 6 – 12 м. Однако данный вопрос требует более подробного исследования и будет рассмотрен в дальнейших исследованиях.

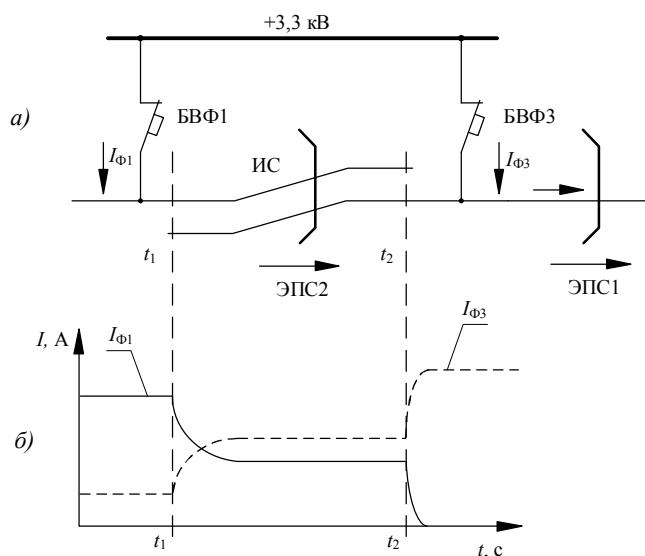


Рисунок 3 – Принципиальная схема ИС (а) и процессы изменения токов смежных питающих линий при проходе по нему второго по ходу движения токоприемника соединенного ЭПС под током (б): ИС – изолирующее сопряжение; ЭПС – электроподвижной состав;  $I_{\Phi 1}$ ,  $I_{\Phi 3}$  – токи питающих линий  $\Phi 1$  и  $\Phi 3$ ; БВФ1, БВФ3 – БВ питающих линий  $\Phi 1$  и  $\Phi 3$

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В соответствии с пунктом 4.4.4 «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года» основные направления научно-технологического развития хозяйства электрификации и электроснабжения связаны с повышением пропускной способности транспортных коридоров и обеспечением надежной работы устройств контактной сети и тяговых подстанций [7].

Так, на полигоне Западно-Сибирской железной дороги в 2024 г. проведена опытная эксплуатация 22 поездов повышенной массы и длины, 16 из которых – на участках электроснабжения постоянного тока, а также согласно Приказу [8] на постоянной основе курсируют соединенные поезда по следующим направлениям:

- Инская – Исилькуль массой до 14 200 т в нечетном направлении;
- Исилькуль – Входная массой до 12 000 т в четном направлении;
- порожние Исилькуль – Входная – Инская, Входная – Иртышское;
- опытные поездки соединенных контейнерных поездов на участке Инская – Мариинск.

В связи с тенденцией на увеличение скоростей и масс поездов в России актуальность данной проблемы возрастает, так как увеличивается и потребляемый электродвигателями ЭПС максимальный рабочий ток.

На рисунке 4 приведены осциллограммы ТПС Углерод Западно-Сибирской железной дороги, зафиксированные цифровым терминалом защит (ЦТ) ИнТер-3,3 выключателей присоединений БВФ5 сбегавшей (а) и БВФ3 набегающей (б) ветвей ИС при проходе по ним токоприемника ЭПС под током.

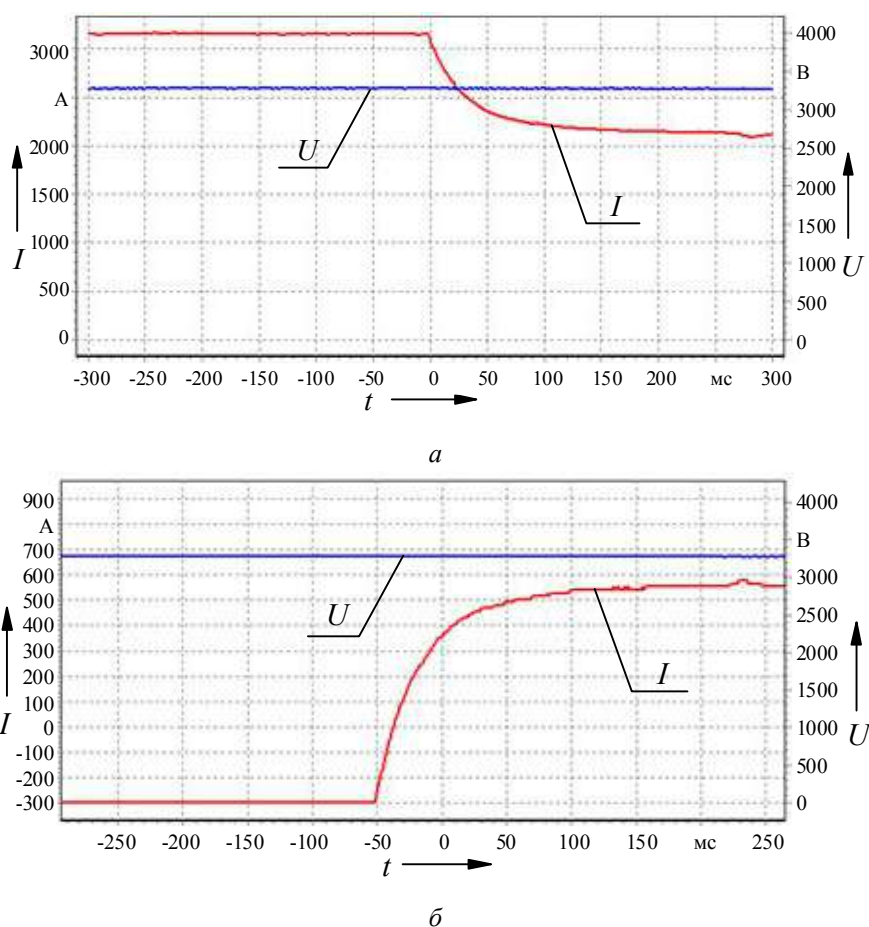


Рисунок 4 – Осциллограммы присоединений Ф5-3,3 сбегавшей (а) и Ф3-3,3 набегающей (б) ветвей ИС ТПС Углерод при проходе токоприемника ЭПС под током

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Характерной особенностью осциллограмм прохода ИС является отсутствие скачков напряжения в момент замыкания обеих ветвей изолирующего сопряжения, что нехарактерно для режима короткого замыкания (КЗ). Отсутствие скачков объясняется тем, что в момент замыкания ветвей ИС токоприемником происходит перераспределение нагрузки между присоединениями, питающимися от одного источника – тягового выпрямителя, а ее величина не меняется. При КЗ же происходит резкое возрастание значения тока, которое приводит к падению напряжения на выходе выпрямителя в соответствии с его внешней характеристикой.

Еще одной отличительной чертой является относительно низкая скорость нарастания величины тока (СНТ)  $dI/dt$ . В большинстве проанализированных осциллограмм ложных отключений значение СНТ не превышает 50 А/мс, а при КЗ минимальное значение СНТ составляет около 200 – 300 А/мс.

Однако такая идеальная картина прохода ИС наблюдается не всегда. На рисунке 5 показан переходный процесс на тех же присоединениях контактной сети, но на осциллограмме присутствуют скачки тока нагрузки. Такой вид осциллограммы предположительно соответствует проходу поезда с кратной тягой.

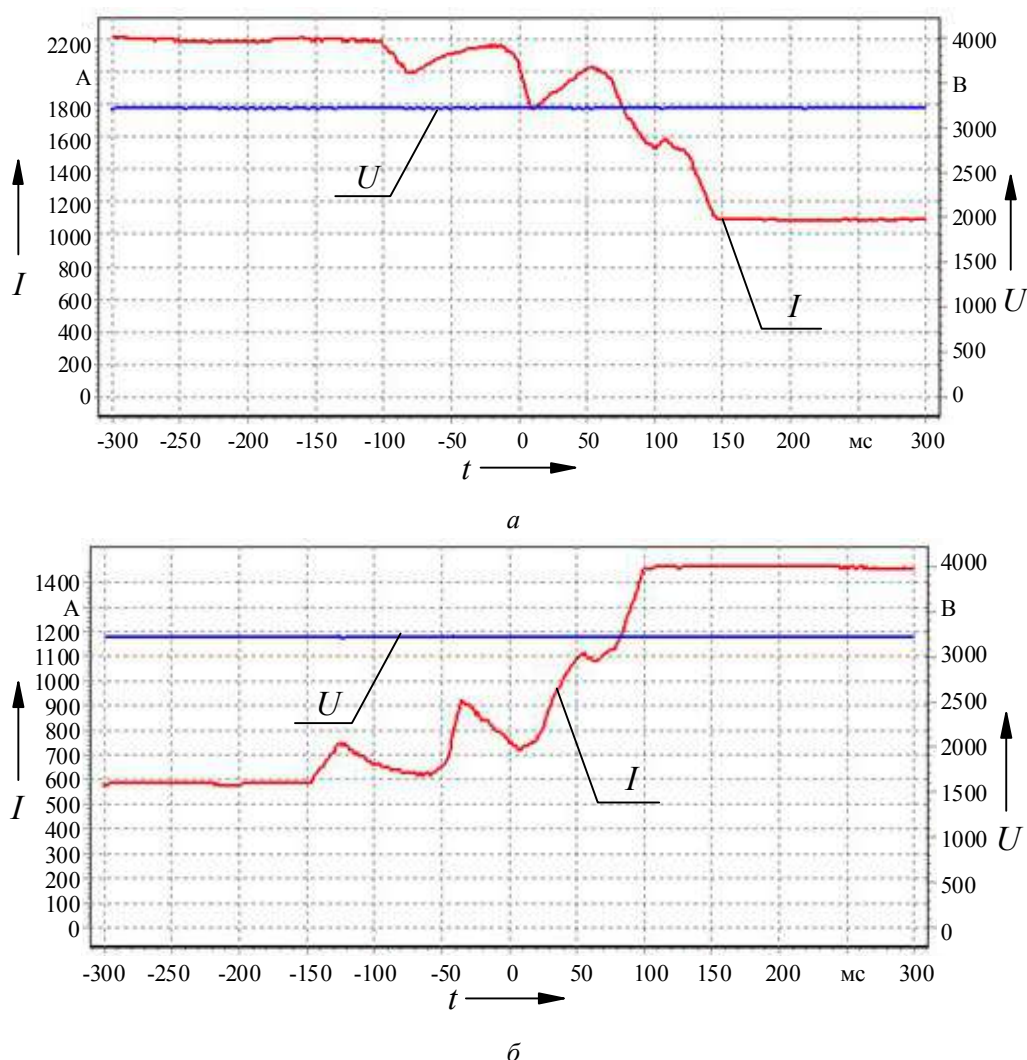


Рисунок 5 – Осциллограммы присоединений Φ5-3,3 сбегаящей (а) и Φ3-3,3 набегающей (б) ветвей ИС ТПС Углерод при проходе токоприемника ЭПС под током с бросками тока из-за отрывов токоприемника

При проходе ИС первым токоприемником характер изменения токов соответствует показанному на рисунке 4, однако после его прохода возникают колебания конструкции изолирующего сопряжения. Поэтому в момент захода следующего по ходу движения

токоприемника ЭПС на осциллограмме наблюдаются броски тока нагрузки величиной 300 – 400 А ввиду кратковременных отрывов токоприемника от контактного провода. Отсутствие снижения величины тока до нулевых значений объясняется наличием нагрузки (первого токоприемника), которая уже получает питание только от питающей линии «набегающей» ветви.

Скорость нарастания тока на ПЛКС в этом случае будет зависеть от параметров тяговой сети, а продолжительность и амплитуда бросков тока – от величины тягового тока и характера колебаний ИС.

Эти факторы вызывают сложности при выделении признаков, отличающих аварийные режимы от нормальных, так как режим короткого замыкания, возникающий в контактной сети, также характеризуется большой скоростью нарастания тока и его бросками.

В настоящее время происходит постепенное техническое перевооружение распределительных устройств РУ-3,3 кВ тяговых подстанций и постов секционирования постоянного тока, в том числе с установкой современных ЦТ защит ПЛКС ИнТер-3,3 кВ производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО».

Терминал в соответствии с Руководством [9] позволяет реализовать достаточно широкий спектр защит и функций автоматики. Кроме того, существует возможность реализации на базе данного терминала новых алгоритмов или модернизации существующих благодаря гибкой логике устройства. Эти свойства терминала планируется использовать для решения проблемы ложных срабатываний выключателей питающих линий контактной сети постоянного тока при проходе электроподвижным составом изолирующего сопряжения.

Проанализированные осциллограммы, зафиксированные ЦТ при проходе изолирующего сопряжения ЭПС под током, позволяют сделать вывод о том, что современные устройства защит достаточно достоверно регистрируют данные процессы. Соответственно такие терминалы можно применять для решения проблемы ложных отключений БВ ПЛКС.

Следует отметить, что практика применения ЦТ подразумевает их использование совместно с МИЗ, которая является основной для БВ ПЛКС [3]. Выводить ее из работы нежелательно ввиду снижения вследствие этого надежности электроснабжения тяговой сети [10]. Однако она же является главной причиной ложных отключений БВ из-за неселективной работы ввиду высокой чувствительности к резким изменениям (приращениям) тока. Поэтому задача исключения таких отключений сводится к поиску параметров, на основании которых цифровой терминал будет блокировать работу МИЗ.

Дальнейшим направлением исследований авторы считают анализ осциллограмм отключений выключателей смежных присоединений контактной сети с наибольшим количеством ложных отключений, записанных микропроцессорными терминалами защит ИнТер-3,3, и выявление характерных признаков, отличающих нормальный и аварийный режимы от режима прохода ЭПС изолирующего сопряжения, а также создание математической модели данного процесса. На основе полученных данных планируется разработка организационных и технических мероприятий, направленных на исключение ложных срабатываний выключателей при проходе ЭПС изолирующего сопряжения.

### *Список литературы*

1. Протокол № 5 заседания секции «Электрификация и электроснабжение» Научно-технического совета ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». – Москва, 2023. – 10 с. – Текст : непосредственный.
2. Горькин, А. В. Повышение эффективности эксплуатации коммутационных устройств тягового электроснабжения постоянного тока : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горькин Артем Владимирович ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2019. – 146 с. – Текст : непосредственный.

3. СТО РЖД 07.021.5–2018 Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока / ОАО «РЖД». – Москва, 2018. – 107 с. – Текст : непосредственный.
4. Такарлыкова, А. С. Изолирующий промежуток тяговой сети постоянного тока для условий скоростного и тяжеловесного движения : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Такарлыкова Алла Сергеевна ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2009. – 161 с. – Текст : непосредственный.
5. Колин, А. Ф. Предупреждение пережогов проводов в местах секционирования контактной сети / А. Ф. Колин, В. А. Савченко. – Москва : Транспорт, 1978. – 72 с. – Текст : непосредственный.
6. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания / М. И. Векслер. – Москва : Транспорт, 1976. – 120 с. – Текст : непосредственный.
7. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. / ОАО «РЖД». – Москва, 2024. – 346 с. – Текст : непосредственный.
8. Приказ «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» № ЦТ-176, / ОАО «РЖД». – Москва, 2023. – 104 с. – Текст : непосредственный.
9. Руководство по эксплуатации. Терминал интеллектуальный присоединения 3,3 кВ ИнТер-3,3 / Санкт-Петербург : НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2013. – 75 с. – Текст : непосредственный.
10. Горькин, А. В. Анализ работы коммутационных аппаратов тяговой подстанции постоянного тока в условиях прохождения электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током / А. В. Горькин. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 251–256. – EDN RZNQBH.
11. Такарлыкова, А. С. Изолирующий промежуток контактной сети постоянного тока для скоростного и тяжеловесного движения / А. С. Такарлыкова. – Текст : непосредственный // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – № 6. – С. 46–48. – EDN JXVICV.
12. Прохорский, А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции / А. А. Прохорский. – Москва : Транспорт, 1983. – 496 с. – Текст : непосредственный.

### Referenses

1. Minutes of the meeting of the section "Electrification and Power supply" of the Scientific and Technical Council JSCo «Russian Railways». Moscow, JSCo «Russian Railways» Publ., 2023, 10 p. (In Russian).
2. Gor'kin A.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii kommutatsionnykh ustroystv tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka* (Improving the efficiency of operation of switching devices for DC traction power supply). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2019, 146 p. (In Russian).
3. STR RZD 07.021.5-2018 Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 5. Method of selection of protection settings in the DC traction system. Moscow, JSCo «Russian Railways» Publ., 2018. 107 p. (In Russian).
4. Takarlykova A.S. *Izoliruiushchii promezhutok tiagovoi seti postoiannogo toka dlia uslovii skorostnogo i tiazhelovesnogo dvizheniia* (Insulating gap of the DC traction network for high-speed and heavy traffic conditions). Doctor's thesis, Moscow, RUT, 2009, 161 p. (In Russian).
5. Kolin A.F. *Preduprezhdenie perezhogov provodov v mestakh seksionirovaniia kontaktnoi seti* [Prevention of wire burns in places where the contact network is partitioned]. Moscow, Transport Publ., 1978, 72 p. (In Russian).

6. Veksler M.I. *Zashchita tiagovoi seti postoiannogo toka ot tokov korotkogo замыкания* [Protection of the DC traction network from short-circuit currents]. Moscow, Transport Publ., 1976, 120 p. (In Russian).

7. Energy strategy of the holding «Russian Railways» for the period until 2025 and for the future until 2030. Moscow, JSCo «Russian Railways» Publ., 2024, 346 p. (In Russian).

8. The order «On the establishment of the norms of masses and lengths of passenger and freight trains on the sections serviced by the West Siberian Thrust Directorate». Moscow, JSCo «Russian Railways» Publ., 2023, 104 p. (In Russian).

9. User manual. 3.3 kV intelligent connection terminal InTer-3,3. Saint-Petersburg, NIEFA-ENERGO Publ., 2013, 75 p. (In Russian).

10. Gor'kin A.V. [Analysis of the operation of switching devices of a DC traction substation under conditions of passage of insulating interfaces by an electric rolling stock under current] *Pribory i metody izmerenii, kontrolia kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte: Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport: Materials of the all-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Omsk, 2013, vol. 1, pp. 251-256. EDN RZNQBH. (In Russian).

11. Takarlykova A.S. The insulating gap of the DC contact network for high-speed and heavy traffic. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaiia promyshlennost' – Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, 2008, no. 6 (13), pp. 46-48. EDN JXVICV. (In Russian).

12. Prokhorskii A.A. *Tiagovye i transformatornye podstantsii* [Traction and transformer substations]. Moscow, Transport Publ., 1983, 496 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Кондратьев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

### Классен Владимир Вячеславович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-27-61.

E-mail: klassno-o@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кондратьев, Ю. В. О ложных срабатываниях выключателей питающих линий контактной сети постоянного тока при проходе электроподвижным составом изолирующего сопряжения / Ю. В. Кондратьев, В. В. Классен. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 19 – 27.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kondratiev Yuri Vladimirovich

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.

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

E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

### Klassen Vladimir Vyacheslavovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric Power Supply of Railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-27-61.

E-mail: klassno-o@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kondratiev Yu.V., Klassen V.V. About the DC contact network supply lines switches false triggerings during the insulating connection passage by electric rolling stock. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 19-27. (In Russian).

УДК: 629.4.016.2

Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, А. А. Романова, Н. В. Кириллов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## РАСЧЕТ АКТУАЛЬНОЙ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЗА ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ БОРТОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

**Аннотация.** Целью данной работы является проверка соответствия фактических тягово-энергетических характеристик тепловозов данным, приведенным в Правилах тяговых расчетов, а также возможный разброс указанных параметров в рамках одной серии тепловозов, находящихся в рядовой эксплуатации. Как показали результаты обработки данных микропроцессорных систем управления и диагностики современных тепловозов, в одних и тех же режимах работы мощность, отбираемая на возбуждение синхронных тяговых генераторов, привод мотор-вентиляторов охлаждения дизеля и другие нагрузки могут существенно различаться. Разброс мощности на зажимах выпрямительной установки в номинальном и промежуточном режимах работы у разных тепловозов достигает 40 %, сопротивления цепей параллельно работающим тяговым двигателям могут различаться на 30 % и более, что вызывает соответствующее изменение электрических потерь. В результате уровень фактически реализуемых тяговых и расходных характеристик большинства тепловозов существенно (до 25 %) отличается от рекомендованного Правилами тяговых расчетов, при этом тяговые характеристики секций одного тепловоза могут различаться на 20 % и более. В статье изложена методика и приведены результаты расчета актуальных тягово-энергетических характеристик тепловозов на примере локомотивов серии 2ТЭ116У. Описаны основные алгоритмы, используемые при формировании актуальной тягово-энергетической характеристики. При выполнении расчетов учтено распределение мощности на тягу и вспомогательные нагрузки, приведены результаты определения всех составляющих энергетической цепи тепловоза. Результаты расчета показали также существенное различие между паспортным и фактическим расходом топлива на номинальных и промежуточных позициях контроллера машиниста.

**Ключевые слова:** уточненная тягово-энергетическая характеристика, потери энергии, тяговые свойства, расходная характеристика, подсистема бортовой диагностики, выборка, нагрузочные характеристики, статистическая обработка.

Dmitry N. Kurilkin, Vladimir V. Grachev, Fedor Y. Bazilevsky,  
Anna A. Romanova, Nikita V. Kirillov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation

## CALCULATION OF THE ACTUAL TRACTION AND ENERGY CHARACTERISTICS OF A DIESEL LOCOMOTIVE ACCORDING TO THE DATA OF THE ON-BOARD DIAGNOSTICS SYSTEM

**Abstract.** The purpose of this work is to verify the compliance of the actual traction and energy characteristics of locomotives with the data given in the Rules of Traction calculations, as well as the possible spread of these parameters within one series of locomotives in ordinary operation. As the results of data processing of microprocessor control systems and diagnostics of modern diesel locomotives have shown, in the same operating modes, the power taken to excite synchronous traction generators, the drive of diesel cooling fan motors and other loads can vary significantly. The power spread at the terminals of the rectifier installation in nominal and intermediate operating modes for different locomotives reaches 40%, the resistance of the circuits of parallel traction motors can vary by 30% or more, which causes a corresponding change in electrical losses. As a result, the level of actually realized traction and consumption characteristics of most locomotives differs significantly (up to 25%) from that recommended by the Rules of Traction calculations, while the traction characteristics of sections of one locomotive may differ by 20% or more. The article describes the methodology and presents the results of calculating the actual traction and energy characteristics of locomotives using the example of locomotives of the 2TE116U series. The main algorithms used in the formation of the current traction and energy characteristics are described. When performing calculations, the distribution of power for traction and auxiliary loads is taken into account, and the results of determining all components of the locomotive's energy chain are presented. The calculation results also showed a significant difference between the passport and actual fuel consumption at the nominal and intermediate positions of the driver's controller.

**Keywords:** refined traction and energy characteristics, energy losses, traction properties, consumption characteristics, on-board diagnostics subsystem, sampling, load characteristics, statistical processing.

Начиная с 2006 г. АО «ВНИКТИ» разрабатывается и серийно внедряется линейка микропроцессорных систем управления (МСУ) для магистральных и маневровых тепловозов. Данные системы представляют собой мощные информационно-управляющие комплексы, включающие в себя многофункциональную подсистему управления локомотивом и подсистему бортовой диагностики оборудования.

Подсистема диагностики осуществляет непрерывный ввод и регистрацию большого объема измерительной информации, позволяющей контролировать состояние и режимы работы основного оборудования локомотивов. С частотой два раза в секунду регистрируются более 100 аналоговых измеренных и рассчитанных параметров, до 160 входных и 48 выходных дискретных сигналов. Каждый час накопленная информация записывается на жесткий диск дисплейного модуля, где сохраняется в течение нескольких суток работы тепловоза с последующим конвейерным обновлением. Часть регистрируемой информации может быть использована для расчета фактических тяговых характеристик тепловозов. Как показано в работах [1 – 7], для тепловозов 2ТЭ116У по результатам обработки данных подсистемы диагностики МСУ-ТП могут быть определены следующие параметры энергетической цепи:

- сопротивление в цепи ТЭД и их нагрузочные характеристики;
- мощность на выходе выпрямительной установки;
- мощность затрат энергии на основные виды вспомогательных нагрузок, такие как возбуждение синхронного тягового генератора и возбуждителя, привод вентиляторов системы охлаждения дизеля, подзарядка аккумуляторной батареи, тормозной компрессор.

Для решения этой задачи информация из файлов регистрации подсистемы диагностики локомотива загружается в базу данных. Из имеющихся в базе записей делается выборка с использованием соответствующих алгоритмов поиска [1 – 7].

После формирования выборки достаточного объема определяются затраты энергии на привод основных элементов энергетической цепи локомотива с использованием методик, предложенных в работах [1 – 7].

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики расчета актуальной тягово-энергетической характеристики тепловоза по данным бортовой подсистемы диагностики на примере тепловоза серии 2ТЭ116У.

Расчет тягово-энергетической характеристики локомотива предполагает определение зависимостей силы тяги  $F_k$  (Н) и минутного расхода топлива  $G$  (кг/мин) от скорости движения  $v$  (км/ч). Он выполняется для всех позиций контроллера при всех используемых ступенях ослабления возбуждения ТЭД.

Характеристики рассчитываются отдельно для каждой секции локомотива с использованием следующих зависимостей:

$$F_k = \sum_{i=1}^n F_{ki}; \quad (1)$$

$$F_{ki} = 3,6 \cdot \frac{N_{ki}}{v} = 3,6 \cdot \frac{U_i \cdot I_i - \Delta P_i - \Delta P_{o.p.i} - \Delta P_{m.o.p.i} - \Delta P_{6.yi} - \Delta P_{ki}}{v}; \quad (2)$$

$$G = \frac{g_e \cdot N_e}{60000}, \quad (3)$$

где  $F_{ki}$  – сила тяги, реализуемая  $i$ -й колесной парой, Н;  $N_{ki}$  – касательная мощность, реализуемая  $i$ -й колесной парой, Вт;  $U_i, I_i$  – напряжение и ток  $i$ -го ТЭД;  $\Delta P_i, \Delta P_{o.p.i}, \Delta P_{m.o.p.i}, \Delta P_{6.y.i}, \Delta P_{ki}$  – потери соответственно в ТЭД, осевом редукторе, моторно-осевых подшипниках и буксовом узле  $i$ -й колесной пары, Вт;  $N_e$  – эффективная мощность дизеля, кВт;  $g_e$  – удельный эффективный расход топлива, г/кВт · ч.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Из структуры энергетической цепи тепловозов 2ТЭ116У [1, 7] следует, что эффективная мощность дизеля  $N_e$  может быть определена по формуле:

$$N_e = \sum P + \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{в.у} + P_{в.т.г} + P_{в.с.в} + P_{э.д.к} + P_{а.б} + P_{м.в.х\text{ ср}} + P_{неоткл}, \quad (4)$$

где  $\Sigma P$  – мощность на выходе тяговой выпрямительной установки;  $\Delta P_{\Gamma}$  – мощность потерь энергии в синхронном тяговом генераторе (СТГ) без учета затрат на возбуждение;  $\Delta P_{в.у}$  – мощность потерь в выпрямительной установке;  $P_{в.т.г}$  – мощность, затрачиваемая на возбуждение СТГ;  $P_{в.с.в}$  – мощность, затрачиваемая на возбуждение синхронного возбудителя;  $P_{э.д.к}$  – мощность, затрачиваемая на привод тормозного компрессора;  $P_{а.б}$  – мощность, затрачиваемая на подзарядку аккумуляторной батареи;  $P_{м.в.х\text{ ср}}$  – мощность, затрачиваемая на привод вентиляторов охлаждения воды и масла дизеля;  $P_{неоткл}$  – мощность, затрачиваемая на привод неотключаемых нагрузок.

Схема алгоритма расчета тягово-энергетических характеристик секции тепловоза для всех позиций контроллера показана на рисунке 1.

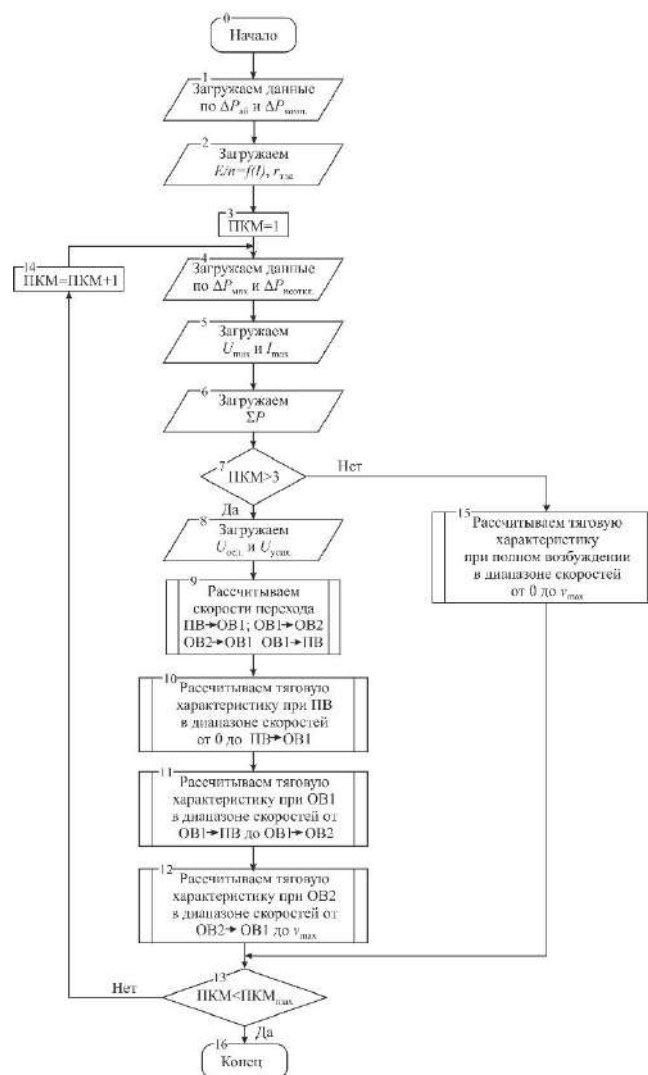


Рисунок 1 – Схема алгоритма расчета тягово-энергетической характеристики секции локомотива

При работе на тяговых позициях управляющая программа МСУ помимо поддержания постоянной мощности дизеля (положения вала исполнительного устройства электронного регулятора дизеля) реализует ограничения максимального тока тягового двигателя  $I_{\max}$  и выпрямленного напряжения тягового генератора  $U_{\max}$ , а также управляет включением и отключением контакторов ослабления возбуждения ТЭД [1, 8].

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Включение и выключение ступеней ослабления возбуждения ТЭД на каждой позиции осуществляются при достижении напряжением на выходе выпрямительной установки (ВУ) заданной для данной позиции величины  $U_{осл}$  ( $U_{усил}$ ), которому при известной мощности на выходе ВУ  $\Sigma P$  соответствует ток  $I_{г\text{осл}}$  ( $I_{г\text{усил}}$ ):

$$I_{г\text{осл}}(I_{г\text{усил}}) = \sum \frac{P}{U_{осл}(U_{усил})} \quad (5)$$

При расчете варьированием скорости движения подбирается такое ее значение  $v_{пер}$ , при котором текущее расчетное значение тока ТЭД будет соответствовать току переключения:

$$I_{гр} = \sum_{i=1}^6 I_i = I_{г\text{зад}} \quad (6)$$

Схема алгоритма расчета скоростей переключения ступеней ослабления возбуждения ТЭД приведена на рисунке 2.

Расчет токов ТЭД, соответствующих текущей скорости движения, ступени ослабления возбуждения и напряжению на его зажимах для каждого ТЭД выполняется с использованием актуальной скоростной характеристики двигателя и нагрузочной характеристики генератора, рассчитанных в соответствии с ранее разработанными методиками [1, 3]. Схема алгоритма расчета приведена на рисунке 3.

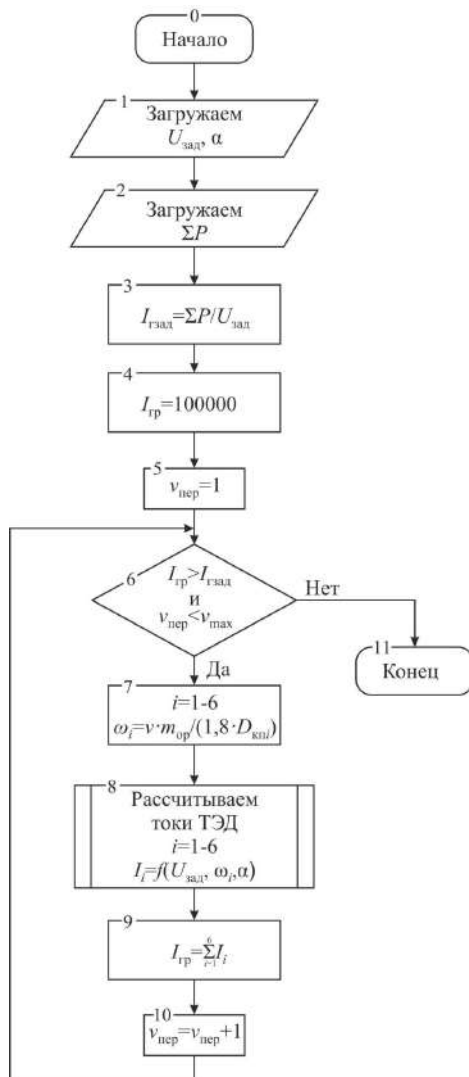


Рисунок 2 – Схема алгоритма определения скоростей изменения степени ослабления возбуждения тяговых электродвигателей

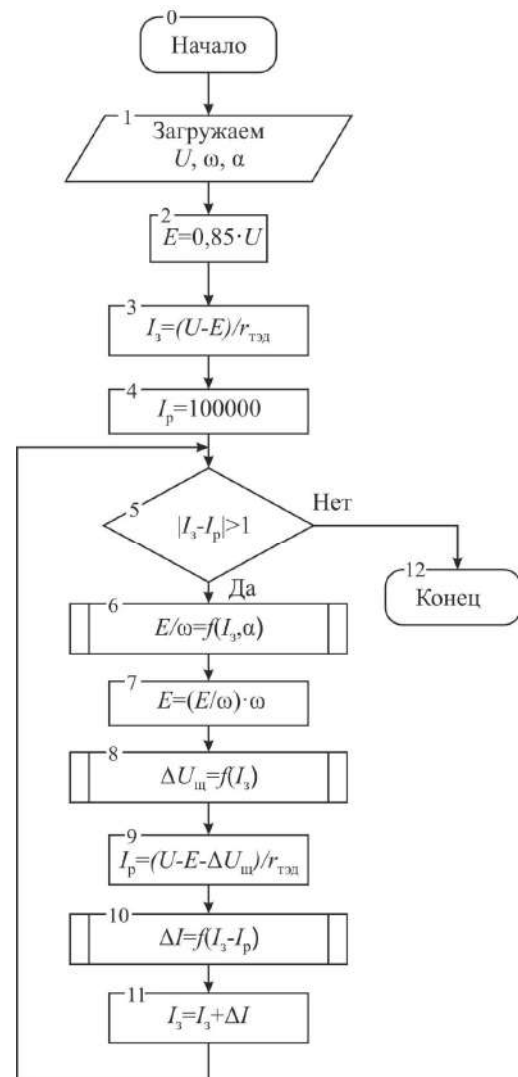


Рисунок 3 – Схема алгоритма расчета действительных скоростных характеристик тяговых электродвигателей

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Алгоритм расчета тяговой характеристики секции локомотива, выполняемый для каждой позиции контроллера, приведен на рисунке 4.

Средние значения мощности  $P_{в.у\ ср}$  и тока  $I_{в.у\ ср}$  на выходе выпрямительной установки для каждой позиции контроллера предварительно рассчитываются по данным предыдущих поездок. По их величине определяются затраты мощности на привод вспомогательных нагрузок и потери в тяговых электрических машинах и выпрямительной установке [1]. После этого по зависимости (4) определяется значение свободной эффективной мощности дизеля  $N_{e\ i}$ , которое далее принимается постоянным в зоне ограничения по мощности для каждой позиции контроллера.

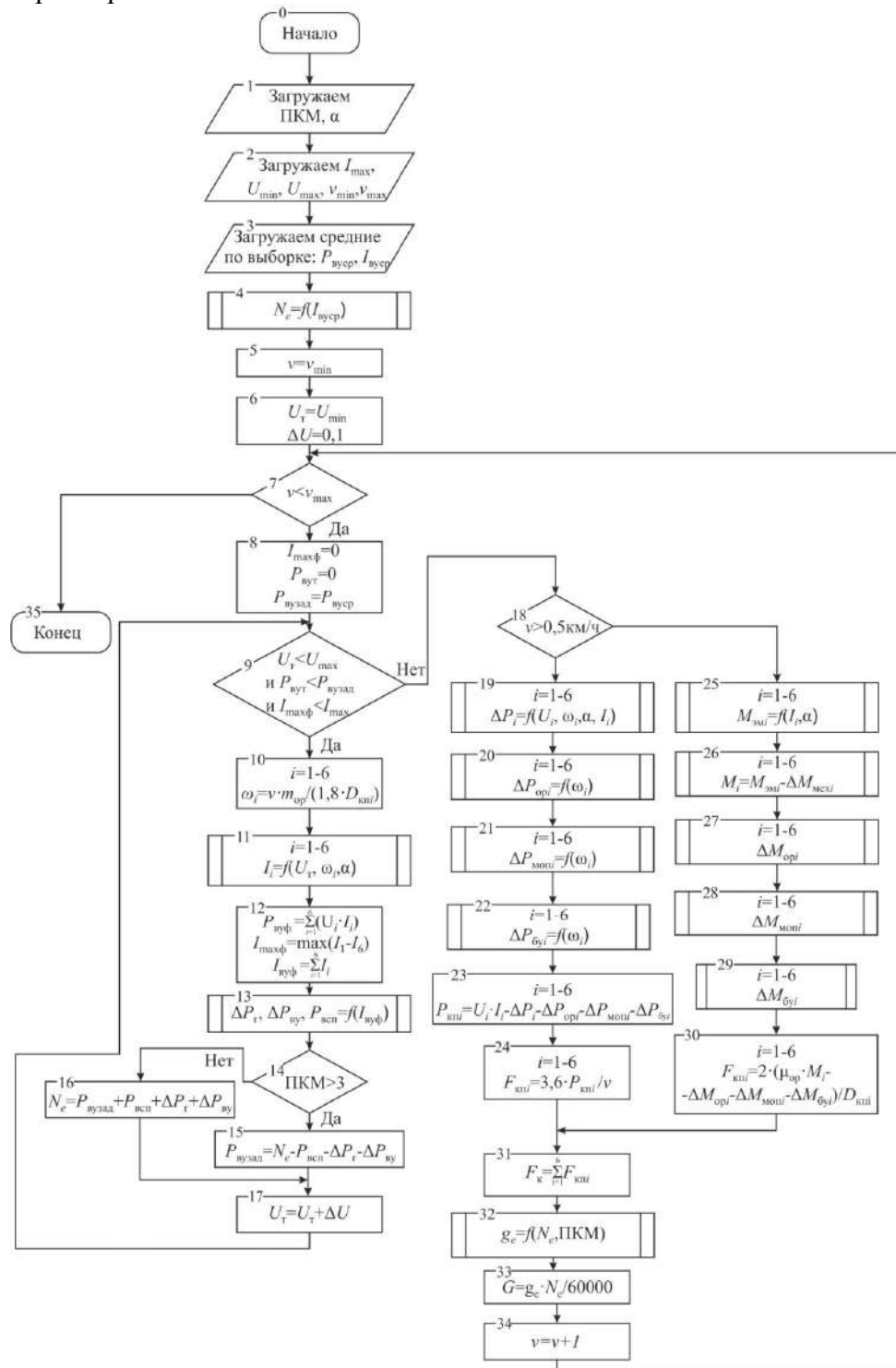


Рисунок 4 – Схема алгоритма расчета тяговой характеристики локомотива в заданном интервале скоростей

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

После этого для каждого значения скорости  $v$  определяются напряжение  $U_T$  и ток с учетом их ограничений на разных участках тяговой характеристики.

На каждом шаге расчета уточняются затраты мощности на вспомогательные нагрузки, а также потери в генераторе и выпрямительной установке, после чего уточняется значение текущей мощности  $\Sigma P$  на зажимах выпрямительной установки для позиций контроллера выше четвертой (на первых трех позициях она остается постоянной).

После определения напряжения на выходе ВУ и токов ТЭД, соответствующих данной скорости движения тепловоза, по методике, изложенной в работе [1], выполняется расчет потерь мощности в ТЭД  $\Delta P_i$ , осевых редукторах  $\Delta P_{o.p.i}$ , моторно-осевых подшипниках  $\Delta P_{m.o.p.i}$ , буксовых узлах  $\Delta P_{б.у.i}$ , контактах «колесо – рельс»  $\Delta P_{к.i}$ , после чего вычисляется сила тяги на оси каждой колесной пары по формуле (2).

Для апробации методики были выбраны четыре тепловоза серии 2ТЭ116У № 187, 189, 190, 193, оборудованные МСУ-ТП и находящиеся в рядовой эксплуатации на полигоне Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги».

В результате обработки данных подсистем бортовой диагностики за период с 20.07.2023 по 26.07.2023 в соответствии с ранее разработанными методиками [1 – 7] были определены зависимости для вычисления мощности на зажимах выпрямительной установки и различных видов потерь, входящих в формулу (4).

Результаты расчета мощности, затрачиваемой на возбуждение тяговых генераторов, для фазного тока генератора 1500 А приведены на рисунке 5.

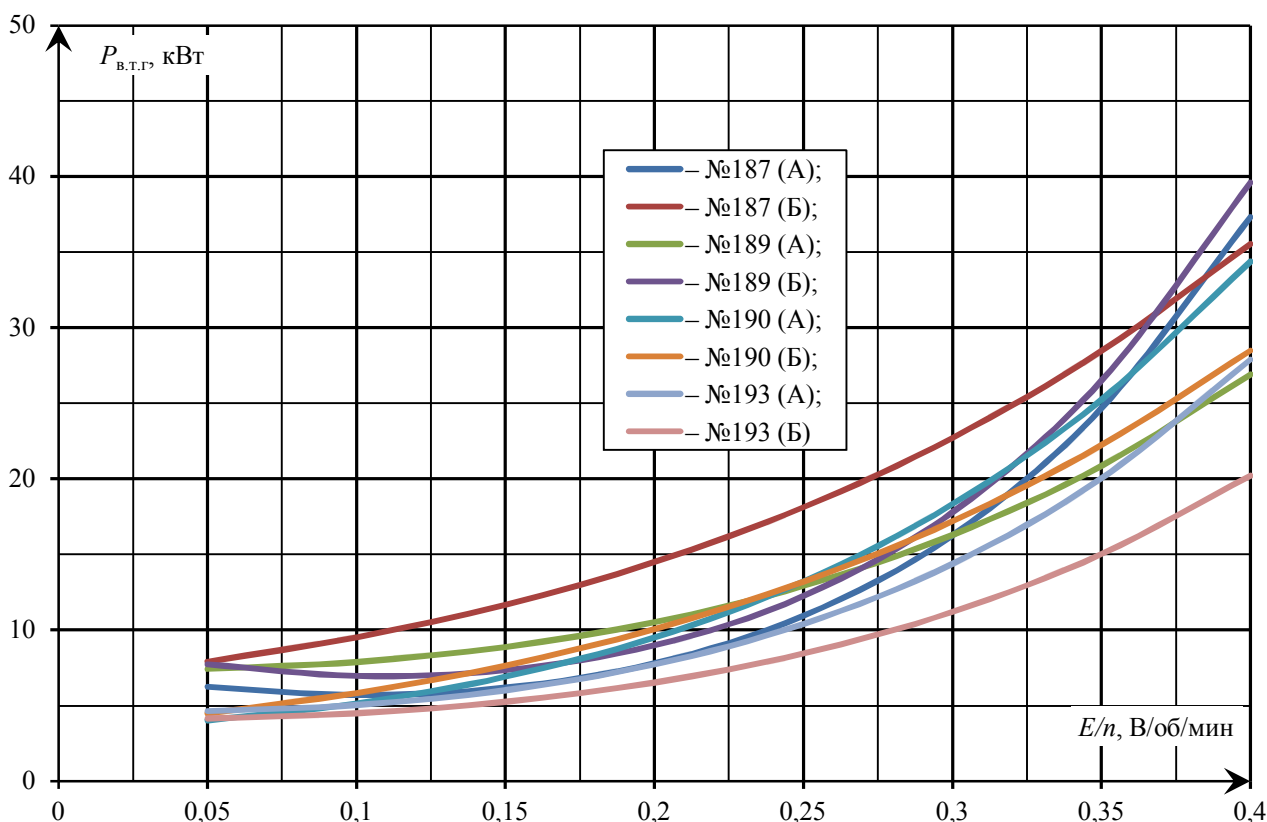


Рисунок 5– Мощность, затрачиваемая на возбуждение тягового генератора при величине фазного тока генератора 1500 А

На рисунке 6 приведены результаты расчета мощности, потребляемой цепью возбуждения синхронного возбудителя.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

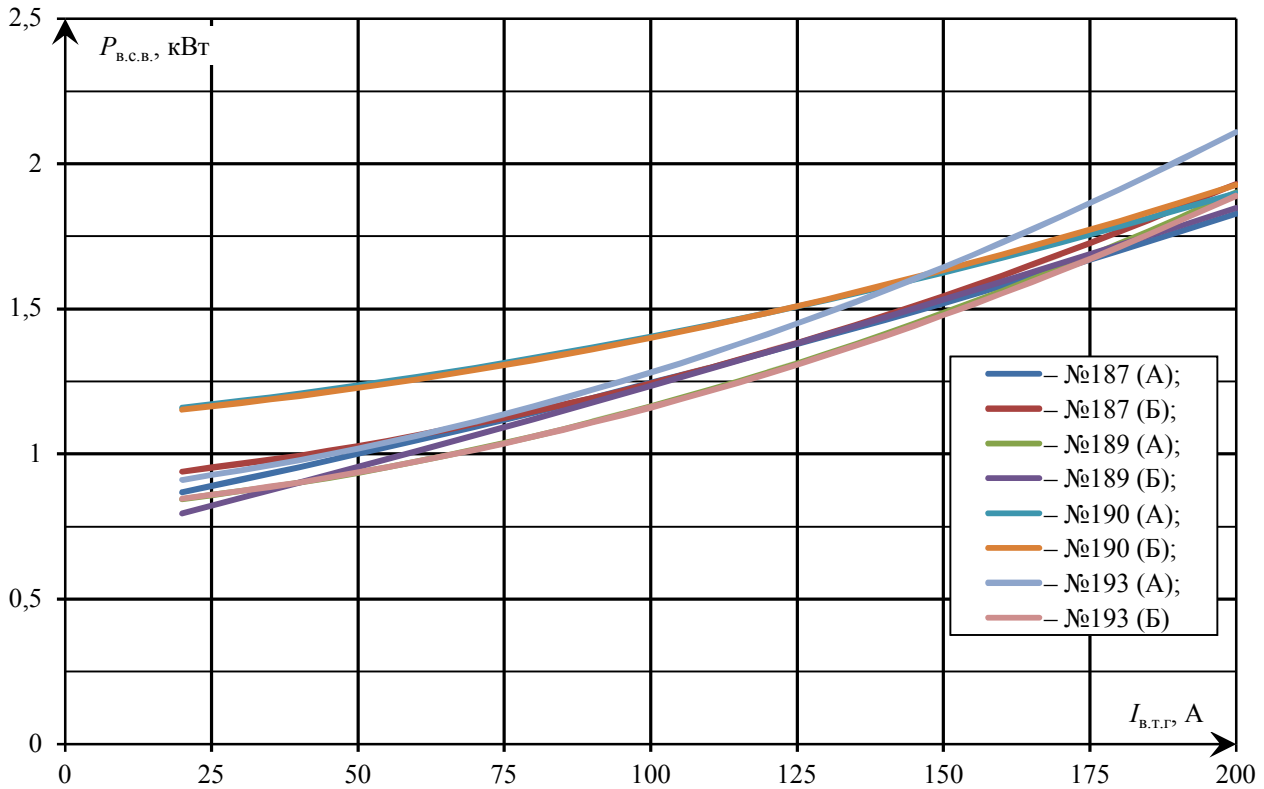


Рисунок 6 – Мощность, потребляемая цепью возбуждения синхронного возбудителя

Затраты мощности на привод мотор-вентиляторов охлаждающего устройства дизеля определяются средним количеством одновременно включенных мотор-вентиляторов  $N_{м.в.х ср}$  (рисунок 7) и средней мощностью одного мотор-вентилятора  $P_{м.в.х ср}$  на разных позициях контроллера.

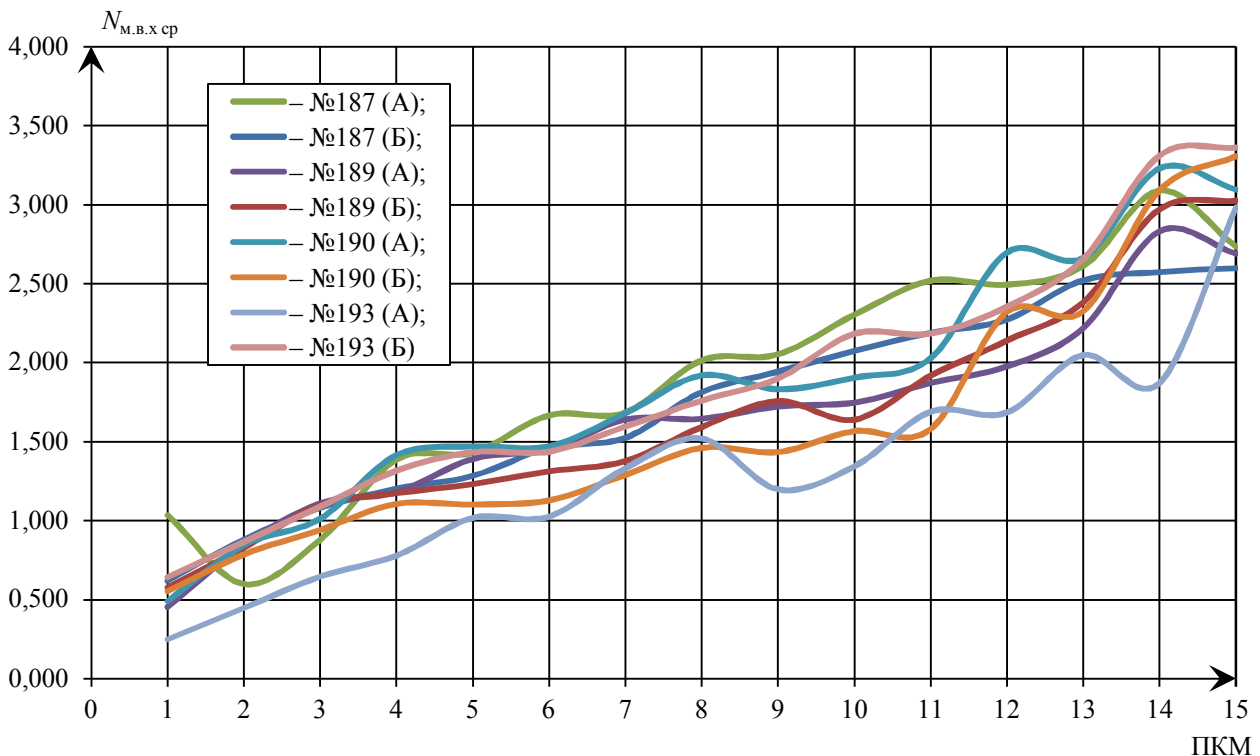


Рисунок 7 – Среднее число одновременно включенных мотор-вентиляторов охлаждения дизеля

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 8 приведены результаты расчета  $P_{м.в.х ср.}$

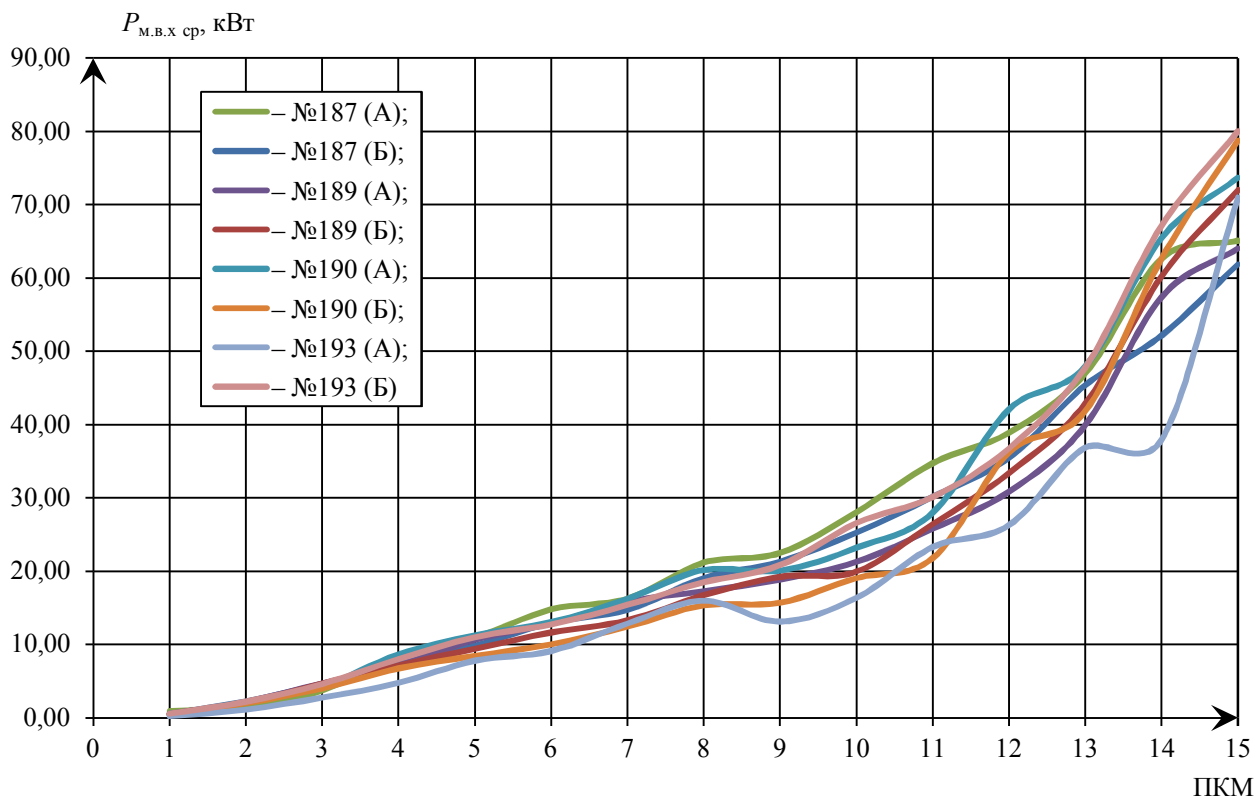


Рисунок 8 – Средняя мощность, затрачиваемая на привод мотор-вентиляторов охлаждения дизеля

Средняя мощность, расходуемая на зарядку аккумуляторной батареи, определялась по методике, приведенной в работах [1, 2].

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Мощность, затрачиваемая на подзарядку аккумуляторной батареи

Локомотив (секция)	187(А)	187(Б)	189(А)	189(Б)	190(А)	190(Б)	193(А)	193(Б)
$P_{а.б.}$ , Вт	703	362	796	1002	451	614	882	724

Определение мощности, затрачиваемой на привод тормозного компрессора, выполнялось в соответствии с ранее разработанной методикой [1]. Результаты расчета средней мощности ( $P_{э.д.к.}$ ), затрачиваемой на привод тормозного компрессора, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Определение мощности, затрачиваемой на включение компрессора

Локомотив (секция)	Число измерений	Общее время наблюдений ( $t_{общ.}$ ), с	Время работы компрессора ( $t_{комп.}$ ), с	$\frac{t_{комп.}}{t_{общ.}} \cdot 100\%$	$P_{э.д.к.}$ , Вт
187(А)	40000	19279	1042	5,4	2230
187(Б)	40000	14851	876	5,90	2414
189(А)	40000	15552	1050	6,75	2693
189(Б)	40000	16877	962	5,71	2324
190(А)	40000	31060	983	3,16	1501
190(Б)	40000	16384	573	3,50	1573
193(А)	40000	17446	1018	6,29	2078
193(Б)	40000	17333	895	5,16	2135

Мощности, реализуемые на выходе выпрямительной установки при работе системы регулирования в зоне поддержания постоянного тока реyki ТНВД, для всех позиций

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

контроллера тепловозов 2ТЭ116У определялись в соответствии с ранее разработанной методикой [1, 7]. Результаты расчета приведены на рисунке 9.

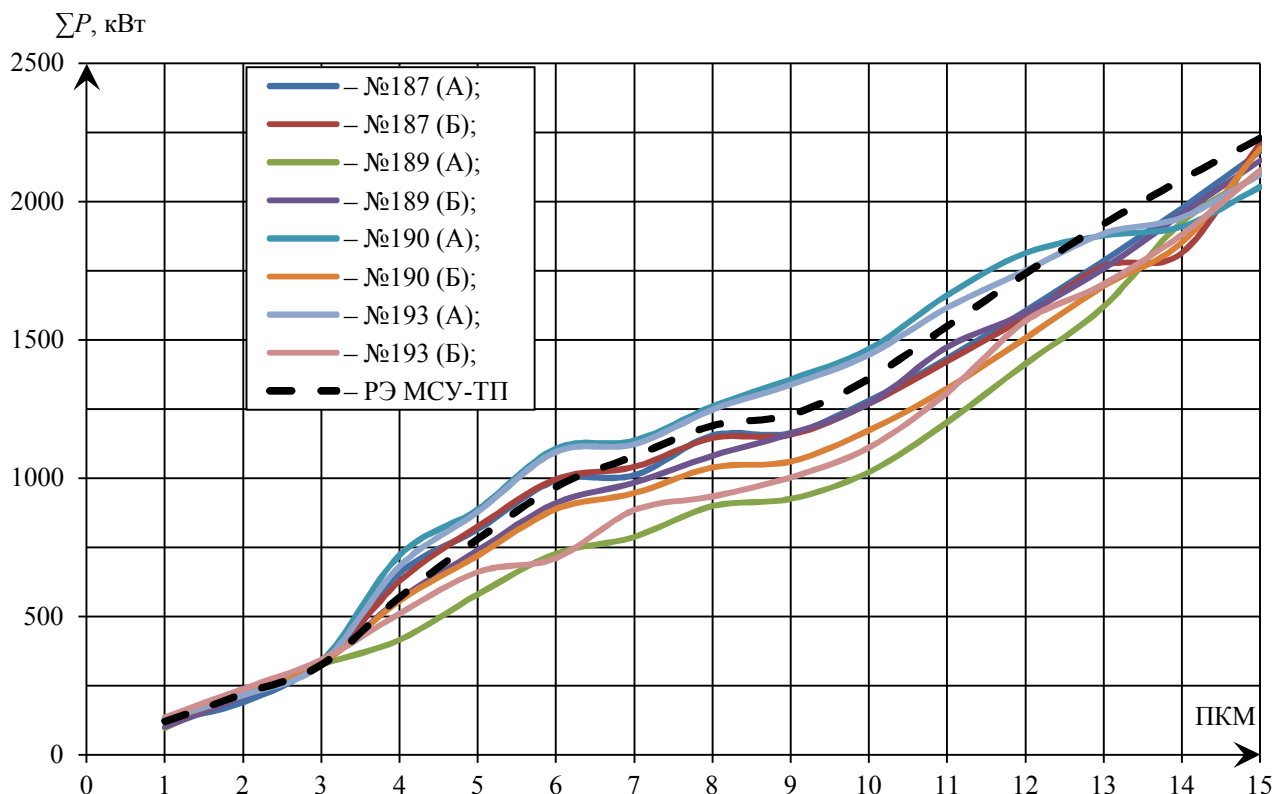


Рисунок 9 – Средняя мощность на выходе выпрямительной установки

Средние значения сопротивления цепей тяговых электродвигателей определялись по параметрам силовой цепи каждого из ТЭД в соответствии с методикой, приведенной в работах [1, 5, 7]. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения сопротивления цепей ТЭД

Локомотив (секция)	Параметр	Номер ТЭД					
		1	2	3	4	5	6
187 (А)	Сопротивление цепи тягового двигателя, Ом	0,0324	0,0432	0,0414	0,0376	0,0416	0,0392
187 (Б)		0,0324	0,0432	0,0414	0,0376	0,0417	0,0392
189 (А)		0,0313	0,0329	0,0387	0,0373	0,0443	0,0343
189 (Б)		0,0324	0,0318	0,0377	0,0384	0,0378	0,0358
190 (А)		0,0362	0,0363	0,0379	0,0429	0,0452	0,0435
190 (Б)		0,0374	0,0365	0,0356	0,0362	0,0469	0,0402
193 (А)		0,0274	0,0290	0,0315	0,0339	0,0307	0,0338
193 (Б)		0,0349	0,0389	0,0387	0,041403	0,0386	0,0339

Расчет нагрузочных характеристик ТЭД по данным регистрации параметров силовой цепи осуществлялся в соответствии с методикой, изложенной в источниках [1, 6], согласно которым нагрузочная характеристика тягового электродвигателя представляет собой зависимость вида:

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = A \cdot I^2 + B \cdot I + C, \quad (7)$$

где  $A, B, C$  – постоянные коэффициенты;  $E$  – ЭДС тягового двигателя;  $\omega$  – угловая скорость вращения якоря тягового двигателя.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Результаты расчета коэффициентов аппроксимирующих зависимостей для тепловоза 2ТЭ116У № 193 приведены в таблице 4. Для остальных тепловозов получены аналогичные результаты.

Таблица 4 – Параметры нагрузочных характеристик ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 193

Номер ТЭД	Полное возбуждение			Ослабленное возбуждение первой ступени			Ослабленное возбуждение второй ступени		
	A·10 <sup>-6</sup>	B	C	A·10 <sup>-6</sup>	B	C	A·10 <sup>-6</sup>	B	C
1. Тепловоз 2ТЭ116У №193, секция А									
	Число записей – 9844			Число записей – 20741			Число записей – 31133		
1	-8,31	0,0137	0,96	-8,21	0,0133	-0,16	-7,75	0,0115	-0,55
2	-8,76	0,0144	0,76	-8,53	0,0139	-0,38	-7,66	0,0118	-0,74
3	-9,23	0,0147	0,73	-7,68	0,0131	-0,21	-6,03	0,0103	-0,47
4	-8,72	0,0142	0,84	-7,94	0,0132	-0,15	-7,67	0,0116	-0,59
5	-9,71	0,0152	0,63	-8,95	0,0143	-0,42	-6,98	0,0115	-0,64
6	-8,34	0,0137	0,97	-7,32	0,0126	-0,07	-6,86	0,0108	-0,47
2. Тепловоз 2ТЭ116У №193, секция Б									
	Число записей – 16610			Число записей – 11740			Число записей – 31432		
1	-9,57	0,0147	0,66	-7,71	0,0125	-0,099	-4,97	0,0093	-0,36
2	-9,21	0,0144	0,78	-7,47	0,0124	-0,072	-4,72	0,0089	-0,26
3	-8,66	0,014	0,77	-6,64	0,0117	-0,098	-4,23	0,0085	-0,34
4	-9,43	0,0145	0,9	-7,51	0,0128	-0,084	-5,99	0,0101	-0,25
5	-9,61	0,0147	0,74	-7,84	0,0128	-0,126	-5,29	0,0095	-0,27
6	-9,99	0,0148	0,69	-7,36	0,0126	-0,169	-7,36	0,0106	-0,34

Результаты расчета тяговой характеристики для 5-й, 11-й и 15-й позиций контроллера рассматриваемых тепловозов приведены на рисунках 10 – 12 соответственно. На рисунках 10 – 12 обозначены паспортные тяговые характеристики одной секции тепловоза 2ТЭ116У согласно ПТР [9].

Как следует из указанных рисунков, уровень действительных тяговых характеристик тепловозов для промежуточных позиций контроллера, на которые приходится основная доля времени работы, существенно отличается от характеристик, рекомендуемых ПТР для выполнения тяговых расчетов. При этом на 11-й ПКМ, наиболее часто используемой на полигоне Октябрьской железной дороги, для семи секций из восьми он ниже рекомендуемой ПТР на 15...25 %. Разброс касательной мощности даже между двумя секциями одного тепловоза 2ТЭ116У может достигать 20 %.

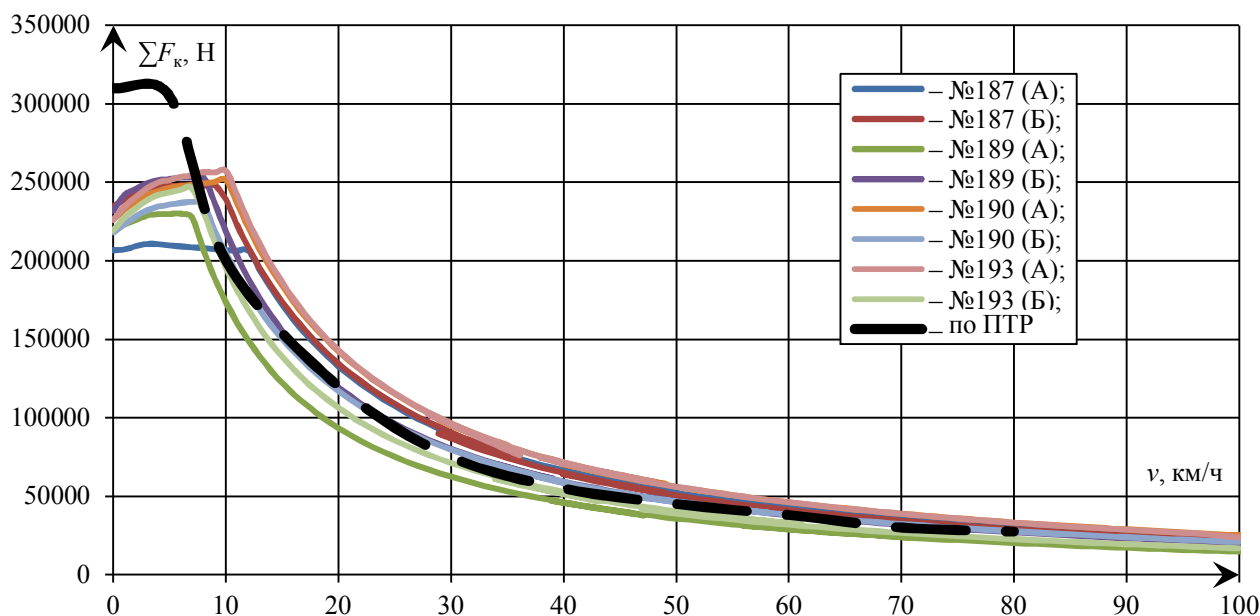


Рисунок 10 – Тяговые характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 5-й позиции контроллера

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

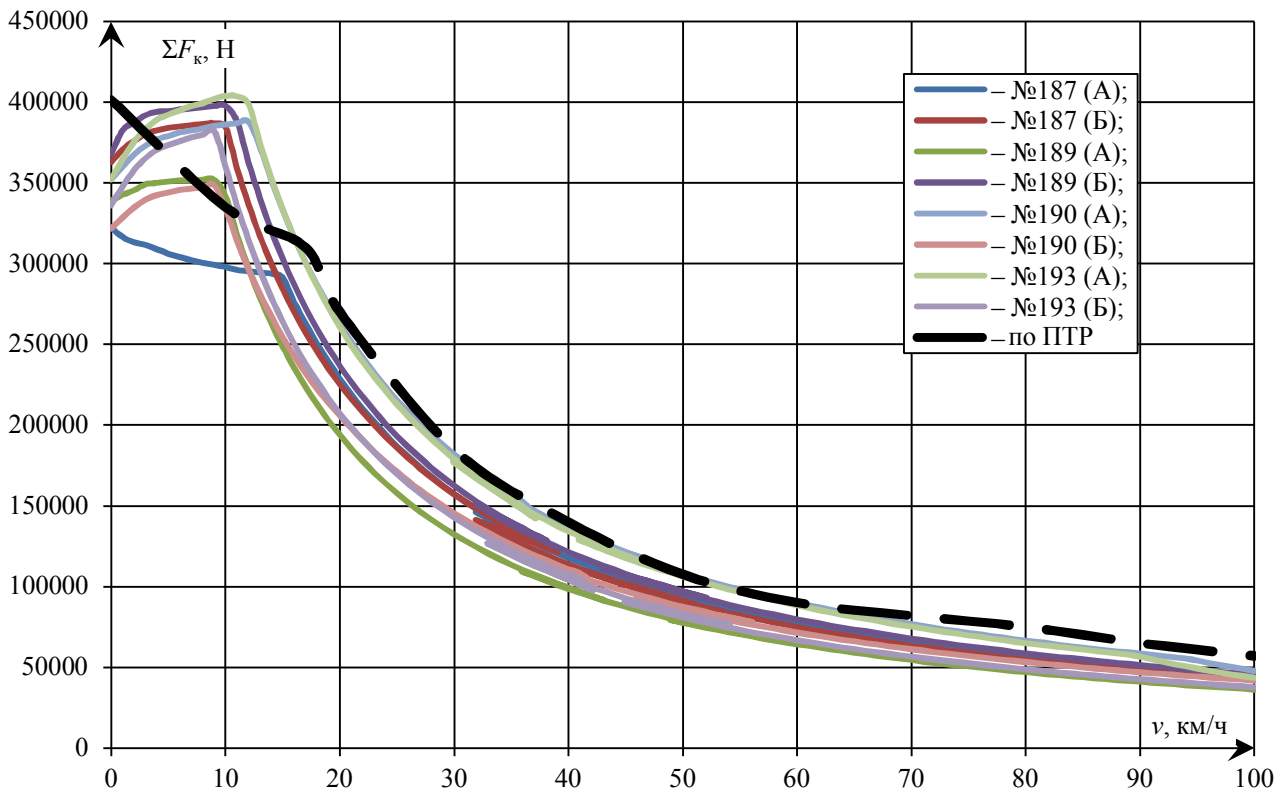


Рисунок 11 – Тяговые характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера

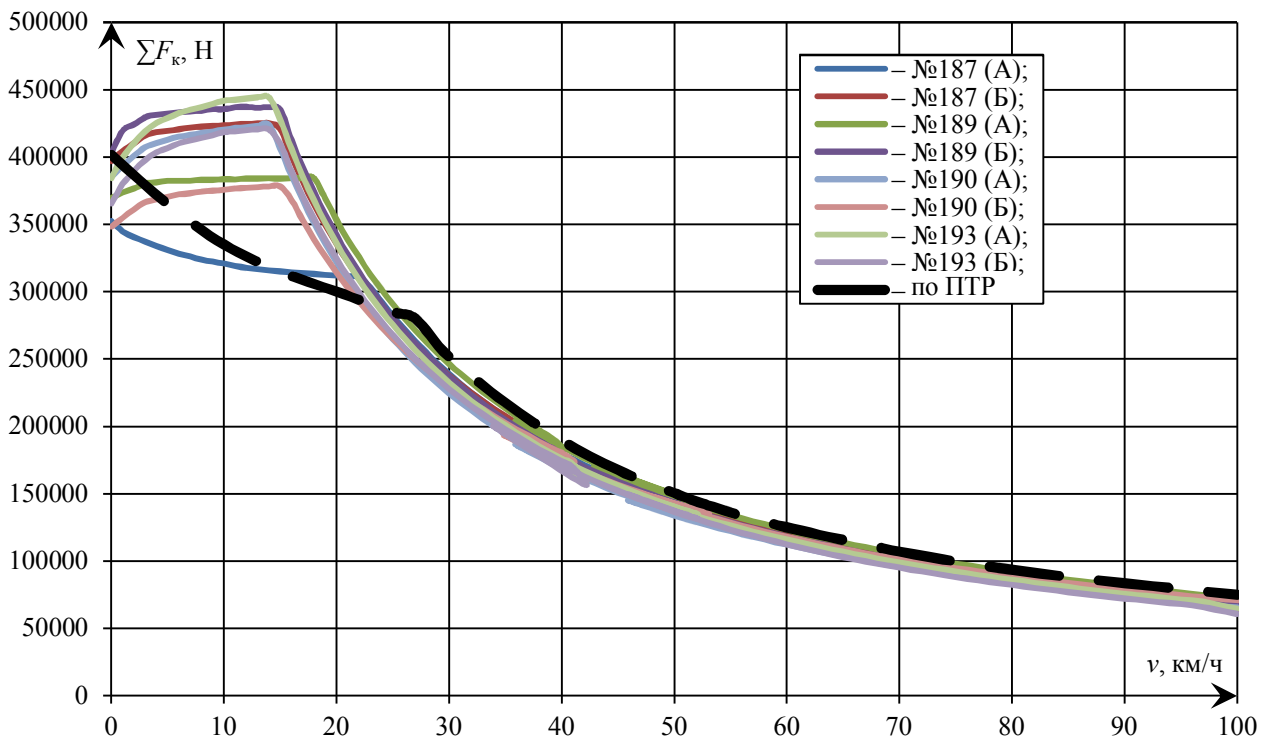


Рисунок 12 – Тяговые характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 15-й позиции контроллера

Актуальные расходные характеристики, соответствующие рассчитанным тяговым характеристикам, вместе с характеристиками, рекомендуемыми ПТР [9] в пересчете на одну секцию тепловоза, приведены на рисунках 13 – 15. Характеристики рассчитывались по ранее разработанной методике [8] с использованием универсальной многопараметровой характеристики дизеля ДГУ 18-9ДГ.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

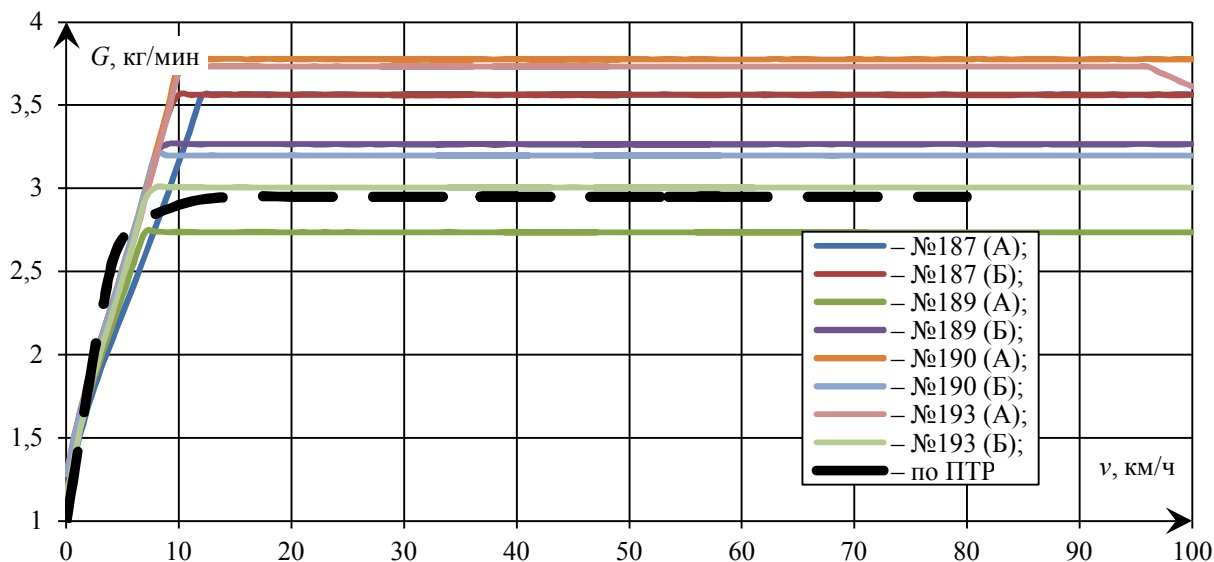


Рисунок 13 – Расходные характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 5-й позиции контроллера

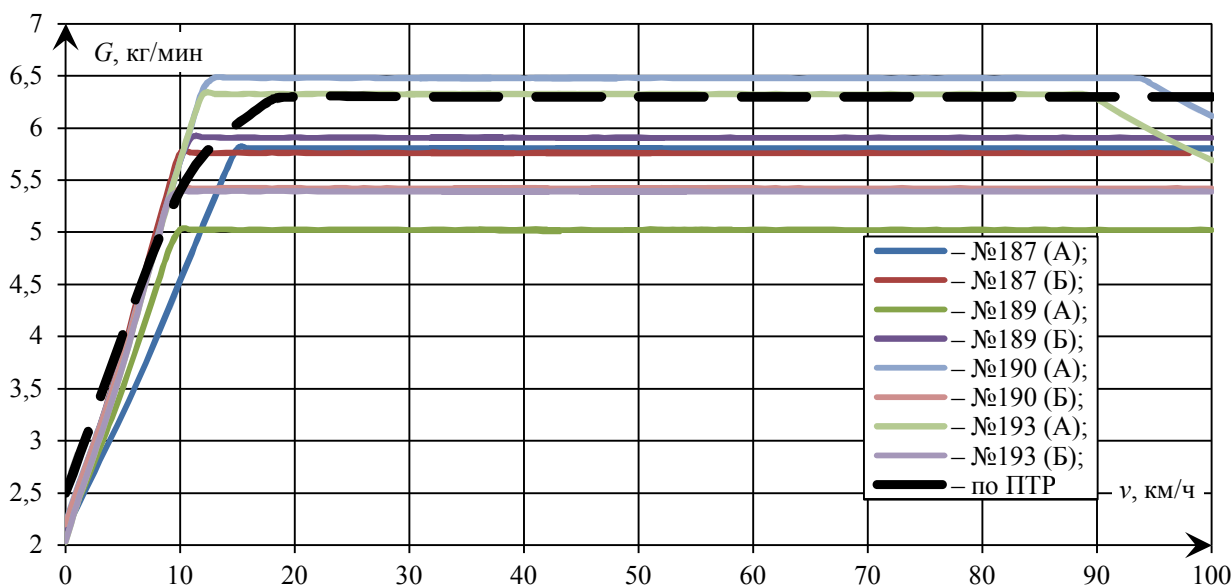


Рисунок 14 – Расходные характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера

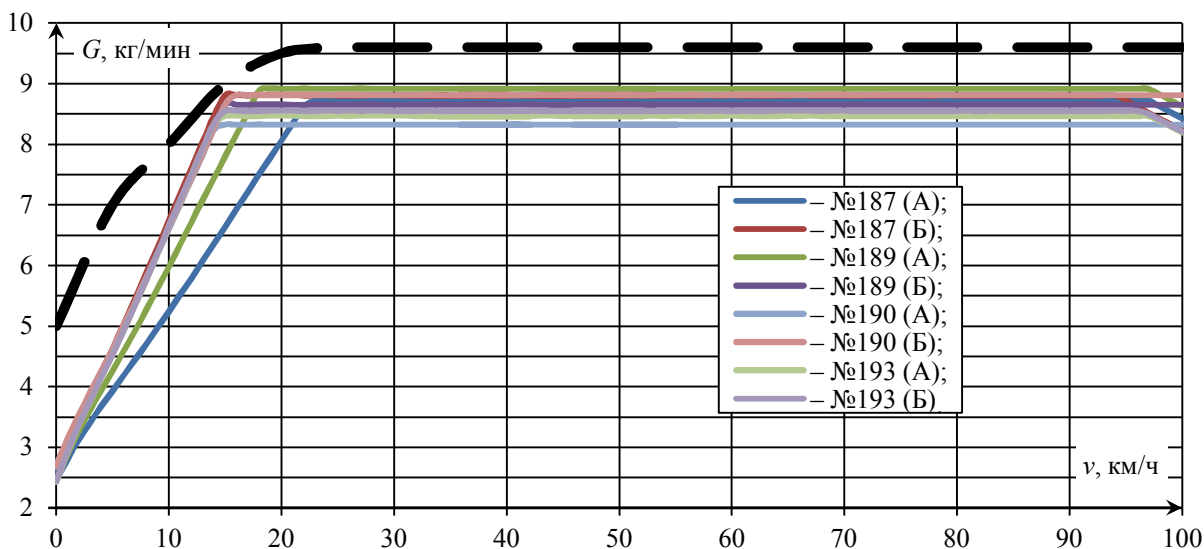


Рисунок 15 – Расходные характеристики секций тепловозов 2ТЭ116У на 15-й позиции контроллера

Как следует из рисунков 13 – 15, уровень расходных характеристик для промежуточных позиций контроллера существенно отличается от приведенного в ПТР. Причем на 5-й позиции контроллера уровень расходной характеристики шести из восьми секций тепловозов превышает указанный в ПТР на 5 – 25 %, в то время, как на 11-й позиции он ниже уровня ПТР на 10 – 25 %. На 15-й позиции контроллера уровень всех расчетных расходных характеристик оказывается ниже рекомендованного ПТР на 7 – 14 %.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Затраты энергии на возбуждение синхронного тягового генератора тепловозов 2ТЭ116У могут различаться практически в два раза при одних и тех же условиях работы.

2. Спротивления цепей параллельно работающих тяговых электродвигателей в одной секции тепловоза могут различаться на 30 %.

3. Разброс мощности на зажимах выпрямительной установки в номинальном и промежуточном режимах работы у разных тепловозов превышает 20 %, а в некоторых случаях может достигать 40 %.

4. Уровень фактически реализуемых тяговых и расходных характеристик у большинства тепловозов существенно (до 25 %) отличается от рекомендованного Правилами тяговых расчетов. Расхождение тяговых характеристик секций одного тепловоза может достигать 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют об актуальности проблемы повышения точности и достоверности тяговых расчетов за счет использования действительных тяговых и расходных характеристик тепловозов, определяемых по данным бортовых систем диагностики.

### *Список литературы*

1. Курилкин, Д. Н. Определение параметров тягово-энергетических характеристик автономных локомотивов по данным микропроцессорных систем управления и диагностики : монография / Д. Н. Курилкин. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2022. – 160 с. – EDN AYAIWH.

2. Курилкин, Д. Н. Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным микропроцессорной системы управления / Д. Н. Курилкин. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 1 – С. 68–74. – EDN EEQIVI. – DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-68-74.

3. Курилкин, Д. Н. Анализ затрат энергии на привод мотор-вентиляторов охлаждающего устройства дизеля тепловоза 2ТЭ116У по данным МСУ-ТП / Д. Н. Курилкин. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 1 (91). – С. 25–33. – EDN DGTICV.

4. Курилкин, Д. Н. Определение затрат энергии на возбуждение тягового генератора по данным микропроцессорных систем управления для прогнозирования тяговой характеристики локомотива / Д. Н. Курилкин. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – №1. – С. 103–117. – EDN QFRQYX. – DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117.

5. Курилкин, Д. Н. Определение сопротивления в цепи тяговых электродвигателей по данным микропроцессорных систем управления / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 4. – С. 74–89. – EDN LRONFO. – DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89.

6. Курилкин, Д. Н. Расчет нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока по данным микропроцессорных систем управления и диагностики / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 124–131. – EDN SWHBZY. – DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_124.

7. Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ): техн. отчет №27-2014-19. Рук. работы Перминов В. А. – Коломна : ОАО «ВНИКТИ», 2014 – 175 с. – Текст : непосредственный.

8. Тепловоз 2ТЭ116У. Руководство по эксплуатации. Часть 3. Использование по назначению. 2ТЭ116.00.00.008-01РЭ2. – 60 с. – Текст : непосредственный.

9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 №867р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 514 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Kurilkin D.N. *Opredelenie parametrov tiagovo-energeticheskikh kharakteristik avtonomnykh lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniia i diagnostiki : monografiia* [Determination of the parameters of traction and energy characteristics of autonomous locomotives according to microprocessor control and diagnostic systems : monograph]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2022, 160 p. (In Russian).

2. Kurilkin D.N. Definition of power expenses on booster charge of rechargeable battery of diesel locomotive according to the data of microprocessor control system. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2022, vol. 19, no.1, pp. 68-74. EDN EEQIVI. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-68-74. (In Russian).

3. Kurilkin D.N. Analysis of energy costs for the drive of the motor fans of the cooling device of the diesel locomotive 2TE116U according to the MSU-TP. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2022, no. 1 (91), pp. 25-33. EDN DGTICV. (In Russian).

4. Kurilkin D.N. Definition of energy expenses on traction generator excitation according to data of microprocessor control systems for locomotive traction characteristic prediction. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2022, no. 1, pp. 103-117. EDN QFRQYX. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-103-117. (In Russian).

5. Kurilkin D.N., Grachev V.V., Tanaev V.F. Defining resistance in traction motor circuit according to microprocessor control system data. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2022, no. 4, pp. 74-89. EDN LRONFO. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89. (In Russian).

6. Kurilkin D.N., Grachev V.V., Tanaev V.F. Calculation of load characteristics of DC traction motors according to microprocessor control and diagnostic systems. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2023, no. 2 (90), pp. 124-131. EDN SWHBZY. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_124. (In Russian).

7. Development of indicators of energy efficiency of locomotives and methods of their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess the quality of repair of locomotives (using the example of diesel locomotives 2TE116U, ТЕР70БС, ТЕМ18ДМ): tech. Report No.27-2014-19. Handiwork of Perminov V.A. Kolomna, JSC "VNIKTI" Publ., 2014, 175 p. (In Russian).

8. Diesel locomotive 2TE116U. User manual. Part 3. Intended use. 2TE116.00.00.008-01RE2. 60 p. (In Russian).

9. Rules of traction calculations for train operation. Approved by the Order of JSC "Russian Railways" on 12.05.2016 No. 867r. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2016, 514 p. (In Russian).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Курилкин Дмитрий Николаевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ПГУПС.

Тел.: 8-812-457-8140.

E-mail: kurilkin@pgups.ru

### Грачев Владимир Васильевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ПГУПС.

Тел.: 8-812-457-8140.

E-mail: lt@pgups.ru

### Базилевский Федор Юрьевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ПГУПС.

Тел.: 8-812-457-8140.

E-mail: lt@pgups.ru

### Романова Анна Анатольевна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ПГУПС.

Тел.: +7-921-759-33-55.

E-mail: anyromanova@inbox.ru

### Кириллов Никита Владимирович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Обучающийся специальности «Подвижной состав железных дорог», специализация «Локомотивы», ПГУПС.

Тел.: +7-911-955-29-01.

E-mail: kmuser240@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Расчет актуальной тягово-энергетической характеристики тепловоза по данным системы бортовой диагностики / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, А. А. Романова, Н. В. Кириллов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 28 – 42.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kurilkin Dmitry Nikolaevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

190031, 9, Moskovsky av., St. Petersburg, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, docent, head of the department «Locomotives and Locomotive Engineering», PGUPS.

Phone: 8-812-457-8140.

E-mail: kurilkin@pgups.ru

### Grachev Vladimir Vasilyevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Locomotives and Locomotive Engineering», PGUPS.

Phone: 8-812-457-8140.

E-mail: lt@pgups.ru

### Bazilevsky Fedor Yurievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Locomotives and Locomotive Engineering», PGUPS.

Phone: 8-812-457-8140.

E-mail: lt@pgups.ru

### Romanova Anna Anatolyevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Wagon and Wagon Industry», PGUPS.

Phone: +7-921-759-33-55.

e-mail: anyromanova@inbox.ru

### Kirillov Nikita Vladimirovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Student of the specialty «Rolling stock of railways», specialization «Locomotives», PGUPS.

Phone.: +7-911-955-29-01.

E-mail: kmuser240@gmail.com

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kurilkin D.N., Grachev V.V., Bazilevsky F.Yu., Romanova A.A., Kirillov N.V. Calculation of the actual traction and energy characteristics of a locomotive according to the data of the on-board diagnostics system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 28-42. (In Russian).

А. А. Комяков, В. И. Иванченко, В. А. Тарасевич, А. Н. Стасюк

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

## РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УПРАВЛЯЕМЫМ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

**Аннотация.** Цель представленной работы – построить физическую модель системы тягового электроснабжения переменного тока с управляемым вольтодобавочным трансформатором и оценить ее работоспособность. Основное назначение разрабатываемой физической модели – оценка эффективности регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции системы электроснабжения в зависимости от падения напряжения в тяговой сети при изменении электротяговой нагрузки переменного тока.

При выполнении работы использованы методы физического и математического моделирования системы тягового электроснабжения переменного тока.

Авторским коллективом была сконструирована физическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока, построенная на основе элементов электрических и электронных схем с регулируемыми параметрами. Качество полученной модели проверено путем сопоставления результатов управления напряжением на физической модели с результатами математического имитационного моделирования.

Полученная физическая модель может быть использована для составления конкретных для заданного участка железной дороги алгоритмов управления напряжением при разработке проекта внедрения управляемого вольтодобавочного трансформатора в реальную систему тягового электроснабжения переменного тока.

В результате проверки физической модели достигнуто значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения THD величиной 14,1 %, что превышает соответствующее значение для имитационной программной модели данной системы (8 %) и объясняется неидеально подобранными параметрами элементов электрической цепи физической модели и эталонного измерительного прибора, что может быть скорректировано в рабочем порядке при дальнейшей эксплуатации полученной физической модели в качестве экспериментального стенда. Таким образом, работоспособность физической модели и ее соответствие физической природе моделируемой системы тягового электроснабжения были подтверждены.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-29-00346 по теме «Применение бустерных трансформаторов с тиристорным управлением для повышения пропускной способности и энергоэффективности участков железных дорог переменного тока».

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, физическая модель, вольтодобавочный трансформатор, регулирование напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

**Alexander A. Komyakov, Vladimir I. Ivanchenko, Viktor A. Tarasevich, Andrey N. Stasyuk**

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

## AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH A CONTROLLED BOOSTER TRANSFORMER PHYSICAL MODEL DEVELOPMENT

**Abstract.** The purpose of the presented work is to build a physical model of an alternating current traction power supply system with a controlled booster transformer and evaluate its performance. The main purpose of the developed physical model is to evaluate the effectiveness of voltage regulation on the power supply system traction substation rigid power lines depending on the voltage drop in the traction network when the AC electric traction load changes.

When performing the work, methods of physical and mathematical modeling of the AC traction power supply system were used.

The team of authors designed a physical model of an alternating current traction power supply system based on elements of electrical and electronic circuits with adjustable parameters. The quality of the obtained model was verified by comparing the results of voltage control on a physical model with the results of mathematical simulation.

The resulting physical model can be used to compile voltage control algorithms specific to a given railway section when developing a project for the introduction of a controlled booster transformer into a real AC traction power supply system.

As a result of checking the physical model, the value of the distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve THD of 14.1 % was achieved, which exceeds the corresponding value for the simulation software model of this system (8 %)

*and is explained by imperfectly selected parameters of the electrical circuit elements of the physical model and the reference measuring device, which can be adjusted in working order during further operation of the obtained a physical model as an experimental stand. Thus, the operability of the physical model and its compliance with the physical nature of the simulated traction power supply system were confirmed.*

*The research was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-29-00346 on the topic "The use of booster transformers with thyristor control to increase the capacity and energy efficiency of AC railway sections".*

**Keywords:** traction power supply system, physical model, booster transformer, voltage regulation, total harmonic distortions.

Система тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока имеет ряд специфических особенностей по сравнению с промышленными нагрузками соизмеримой мощности. Она является протяженным потребителем электроэнергии, что не позволяет запитать все тяговые подстанции от одного центра. Вследствие этого тяговые подстанции СТЭ переменного тока подключаются к ряду центров питания одной или нескольких энергосистем, в результате чего в узлах подключения тяговых подстанций наблюдаются различные по модулю и фазе напряжения. Это приводит к существенной разнице между уровнями напряжения на шинах 27,5 кВ смежных тяговых подстанций. Кроме того, СТЭ переменного тока является нелинейным несимметричным потребителем электроэнергии с резкопеременной нагрузкой, что приводит к постоянным динамическим изменениям токов и напряжений в системе, и, как следствие, к существенным колебаниям уровня напряжения в контактной сети данной СТЭ. Дополнительное влияние на работу СТЭ оказывают наличие нетяговых потребителей, особенности режимов работы системы внешнего электроснабжения и иные факторы.

Указанные особенности СТЭ переменного тока могут приводить к значительному увеличению потерь электроэнергии на тягу поездов [1] и, как следствие, к увеличению себестоимости перевозочного процесса. Поэтому разработка методов и средств автоматического контроля и регулирования уровня напряжения в контактной сети является актуальной задачей для электрифицированного железнодорожного транспорта.

Известны различные способы управления режимами работы систем тягового электроснабжения. В настоящее время из числа активных устройств для СТЭ переменного тока широкое применение нашли, к примеру, управляемые устройства компенсации реактивной мощности, которые, как правило, устанавливаются на постах секционирования контактной сети [2 – 4]. Проводятся исследования по внедрению накопителей электроэнергии, которые также могут быть использованы для управления режимами работы СТЭ постоянного тока [5, 6]. Следует отметить, что внедрение указанных устройств связано с существенными капитальными затратами.

Эффективным средством повышения напряжения в тяговой сети является применение установок продольной емкостной компенсации реактивной мощности (УПК) на тяговой подстанции [7, 8]. Как правило, УПК включаются в отсасывающую линию тяговой подстанции. Применение УПК наиболее эффективно в тяговых сетях со значительным реактивным электропотреблением. Недостатками УПК являются повышение потерь электроэнергии из-за уравнильных токов, снижение равномерности загрузки соседних тяговых подстанций и невысокая надежность из-за тяжелых условий работы силовых конденсаторов [9].

Альтернативным способом повышения пропускной способности и снижения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения является установка вольтодобавочного трансформатора. В России исследования в данном направлении проводились в РУТе (МИИТе) [10, 11]. Вольтодобавочный трансформатор включается в отстающую фазу тяговой подстанции (рисунок 1, а). Вольтодобавочная обмотка включена в рассечку питающей линии, а питающая обмотка – параллельно отстающей фазе 27,5 кВ тяговой подстанции. Трансформатор был введен в опытную эксплуатацию и продемонстрировал удовлетворительные характеристики. Его главным недостатком является невозможность регулирования напряжения в условиях динамически изменяющейся тяговой нагрузки.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В последнее время в связи с активным развитием силовой электроники появляются исследования по разработке управляемых вольтодобавочных трансформаторов. Такие трансформаторы используются для стабилизации напряжения в распределительных сетях 0,4 – 35 кВ [12, 13]. Для применения в системе тягового электроснабжения наиболее перспективной является схема со звеном постоянного тока и инвертором напряжения [14] (рисунок 1, б). Данное устройство является гибридным и имеет двухтрансформаторную структуру, в которой первый трансформатор предназначен для понижения напряжения питающей обмотки с целью его дальнейшего выпрямления, а второй трансформатор – для сопряжения инвертированного напряжения с последовательно включенной вольтодобавочной обмоткой. В дальнейшем тексте статьи для данной структуры будет применяться термин «вольтодобавочный трансформатор».

В предыдущих исследованиях авторов выполнено имитационное моделирование работы бустерных трансформаторов для оценки их энергетических показателей [15 – 18]. Целью настоящего исследования является разработка и апробация физической модели СТЭ переменного тока с управляемым вольтодобавочным трансформатором в лабораторных условиях.

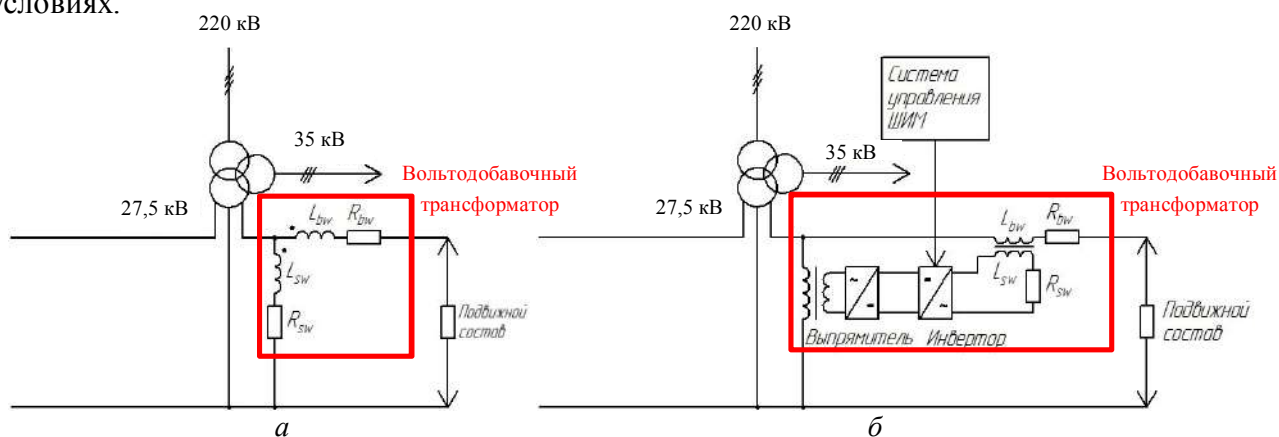


Рисунок 1 – Схема включения вольтодобавочных трансформаторов в систему тягового электроснабжения: а – неуправляемый вольтодобавочный трансформатор, б – управляемый вольтодобавочный трансформатор

Для решения поставленной задачи разработан экспериментальный макет, позволяющий имитировать работу СТЭ переменного тока в условиях функционирования управляемого вольтодобавочного трансформатора с ШИМ-управлением. На рисунке 2, а изображена принципиальная схема макета, а на рисунке 2, б представлен его внешний вид.

Экспериментальный макет состоит из следующих частей: сетевой трансформатор питания схемы (Tr1), однофазный мостовой выпрямитель с фильтром низких частот (НЧ), однофазный мостовой преобразователь (инвертор напряжения) с регулируемой широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), трансформатор преобразователя вольтодобавки (Tr2), дроссель-эквивалент индуктивности электрической линии (Dr1), резистор-эквивалент активного сопротивления линии (R1), дроссель-эквивалент индуктивности нагрузки (Dr2), реостат-эквивалент нагрузки (R2).

Работа макета осуществляется следующим образом.

При подаче сетевого напряжения 220 В на трансформатор питания он начинает вырабатывать переменное напряжение в обмотках II, III и IV. С обмотки II переменное напряжение поступает на эквивалент питающей электрической линии и эквивалент тягового электродвигателя. Обмотка III вырабатывает синхронизирующее переменное напряжение для блоков А1 и А2. С обмотки IV переменное напряжение поступает на диодный мостовой выпрямитель с фильтрующим конденсатором, на выходе которого формируется постоянное напряжение  $V_p$ , которое используется для питания преобразователя вольтодобавки с регулируемой ШИМ.



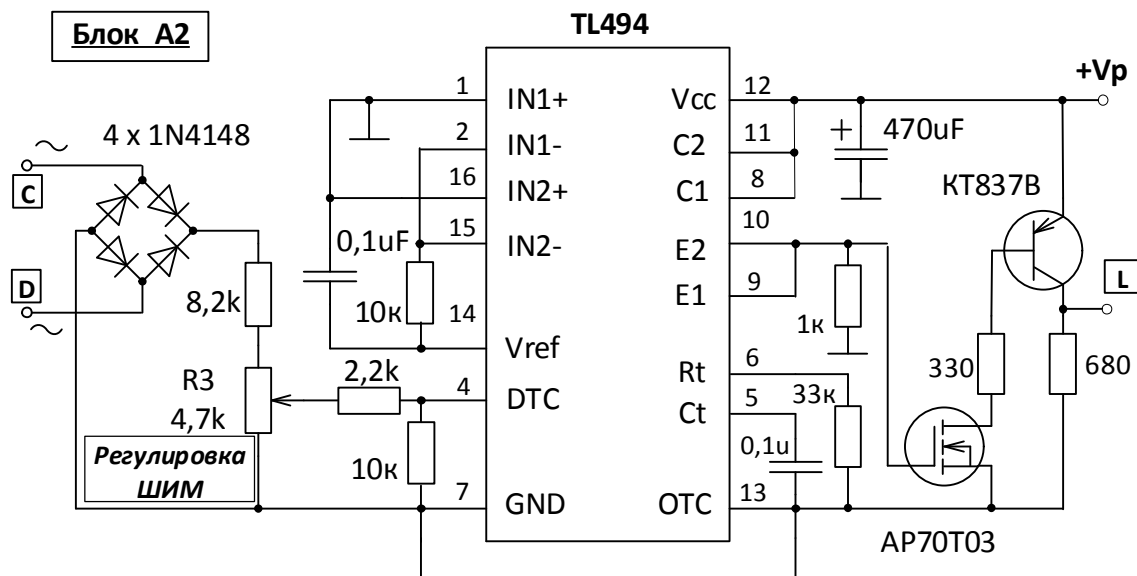


Рисунок 4 – Электрическая схема блока формирования широтно-модулированных импульсов преобразователя вольтдобавки (блока А2)

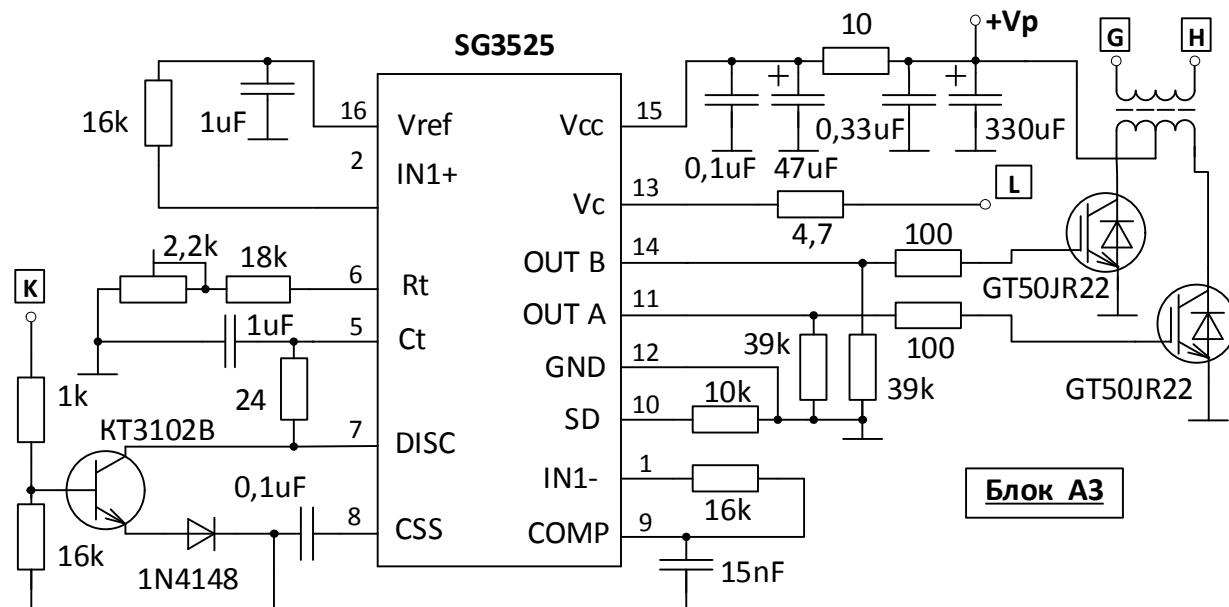


Рисунок 5 – Электрическая схема блока формирования управляющих импульсов преобразователя вольтдобавки (блока А3)

**Блок А1** формирует короткие синхриимпульсы частотой 50 Гц из синусоидального переменного напряжения 50 Гц с обмотки синхронизации III (контакты С и D) сетевого трансформатора Tr1. Далее эти синхриимпульсы поступают в блок А3 через контакт К.

**Блок А2** вырабатывает широтно-модулированные импульсы с собственной частотой около 400 Гц, модулированные переменным напряжением 50 Гц с обмотки синхронизации III (контакты С и D) сетевого трансформатора Tr1. Параметры ШИМ и соответственно уровень вольтдобавки могут вручную регулироваться переменным сопротивлением R3. Далее эти импульсы поступают в блок А3 через контакт L.

**Блок А3** выдает двухтактные управляющие импульсы с собственной частотой 50 Гц, синхронизированные с частотой 50 Гц обмотки синхронизации III (контакты С и D) сетевого трансформатора Tr1, на IGBT-транзисторы, которые нагружены на трансформатор преобразователя вольтдобавки Tr2. Собственная частота 50 Гц, которую вырабатывает блок

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

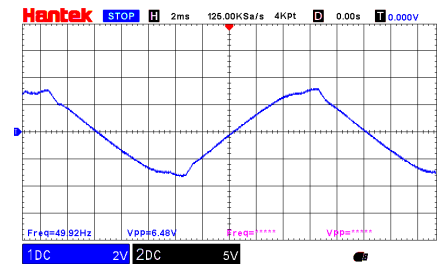
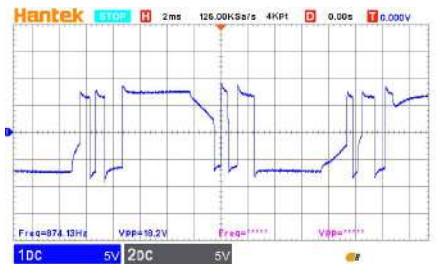

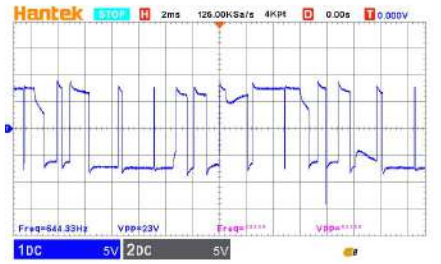

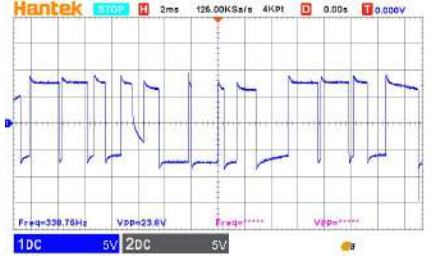
А3, модулирована ШИМ-регулируемым сигналом 400 Гц, поступающим с контакта L блока А2 и синхронизирована импульсами, поступающими с контакта К.

Макет выполнен с коэффициентом масштабирования по напряжению 10000 : 1, т. е. 1 В на макете соответствует 10 кВ на реальном объекте.

Исследование работоспособности физической модели СТЭ переменного тока с управляемым вольтодобавочным трансформатором выполнено следующим образом. В качестве номинального напряжения на электротяговой нагрузке принято значение 27,5 кВ, что соответствует 2,75 В на экспериментальном макете. Путем регулирования электрического сопротивления электротяговой нагрузки имитировалось снижение уровня напряжения в тяговой сети на 500, 2500 и 3500 В (соответственно 0,05, 0,25 и 0,35 В на экспериментальном макете). При помощи регулятора ШИМ формировалась вольтодобавка, необходимая для поддержания на номинальном уровне напряжения на нагрузке. На экспериментальном макете регулирование осуществляется вручную, однако в имитационной модели управление работой вольтодобавочным трансформатором реализовано на основе ПИД-регулятора [18]. Осциллограммы напряжения фиксировались с применением цифрового осциллографа Hantek, а действующее значение напряжения – с применением мультиметра DT-890В.

Осциллограммы напряжения, зафиксированные при различных режимах работы физической модели вольтодобавочного трансформатора, приведены в таблице. Для фиксации осциллограмм на электротяговой нагрузке цифрового осциллографа Hantek подключался к точкам В и Н на рисунке 1, а при измерении напряжения на выходе вольтодобавочного трансформатора – к точкам G и H.

Осциллограммы напряжения в различных режимах работы физической модели СТЭ переменного тока

Действующее напряжение на нагрузке без вольтодобавки, В	Вольтодобавка, В	Осциллограммы напряжения	
		на электротяговой нагрузке	на выходе вольтодобавочного трансформатора
2,7	0,05		
2,5	0,25		
2,4	0,35		

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В первом случае, когда напряжение в контактной сети близко к номинальному, а вольтодобавка минимальна, форма напряжения на электротяговой нагрузке внешне напоминает синусоиду.

Во втором случае формируется вольтодобавка 0,25 В для компенсации падения напряжения в тяговой сети, для чего на выходе вольтодобавочного трансформатора увеличивается продолжительность ШИМ-импульсов напряжения. За счет работы блока синхронизации напряжения на силовом и вольтодобавочном трансформаторах синхронизированы между собой по фазе. В результате суммирования этих напряжений формируется напряжение на электротяговой нагрузке, которое имеет несколько большую несинусоидальность, чем в первом случае.

В третьем случае имитируется еще более значительное снижение уровня напряжения в тяговой сети, которое компенсируется вольтодобавочным трансформатором, и наблюдается некоторое искажение синусоидальности кривой напряжения на электротяговой нагрузке.

Для оценки гармонического состава напряжения на электротяговой нагрузке к экспериментальной установке был подключен прибор для измерения показателей качества электроэнергии «Энерготестер-ПКЭ-А». Измеренное значение действующего напряжения при этом входило в диапазон измерения прибора согласно руководству по эксплуатации (от  $0,01U_{ном}$  до  $2U_{ном}$ ). Однако следует сделать оговорку о том, что относительная погрешность измерения напряжения в данном случае будет увеличена за счет мультипликативной составляющей и для заданных условий измерения будет равна 1 %.

Кроме того, согласно руководству по эксплуатации заводской класс точности прибора при измерении суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента гармонической составляющей напряжения порядка  $n$  гарантируется для диапазона измеряемого напряжения от  $0,1U_{ном}$  до  $1,5U_{ном}$ , однако в данном случае измеряемая величина не входит в указанный диапазон, в результате чего неопределенность измерений увеличивается.

Результаты измерений показывают, что в кривой напряжения присутствуют характерные для СТЭ переменного тока нечетные гармоники, при этом наибольшие значения наблюдаются для гармоник с частотами 150, 250 и 350 Гц. Полученные результаты хорошо коррелируются с предыдущими исследованиями авторов, изложенными в публикациях [15 – 18], в которых работа СТЭ переменного тока с вольтодобавочным трансформатором моделировалась в программном комплексе SimInTech. Осциллограммы напряжений на выходе вольтодобавочного трансформатора и на электротяговой нагрузке имеют схожую форму с осциллограммами, полученными путем имитационного моделирования, а спектральный состав кривой напряжения также аналогичен (рисунок 6).

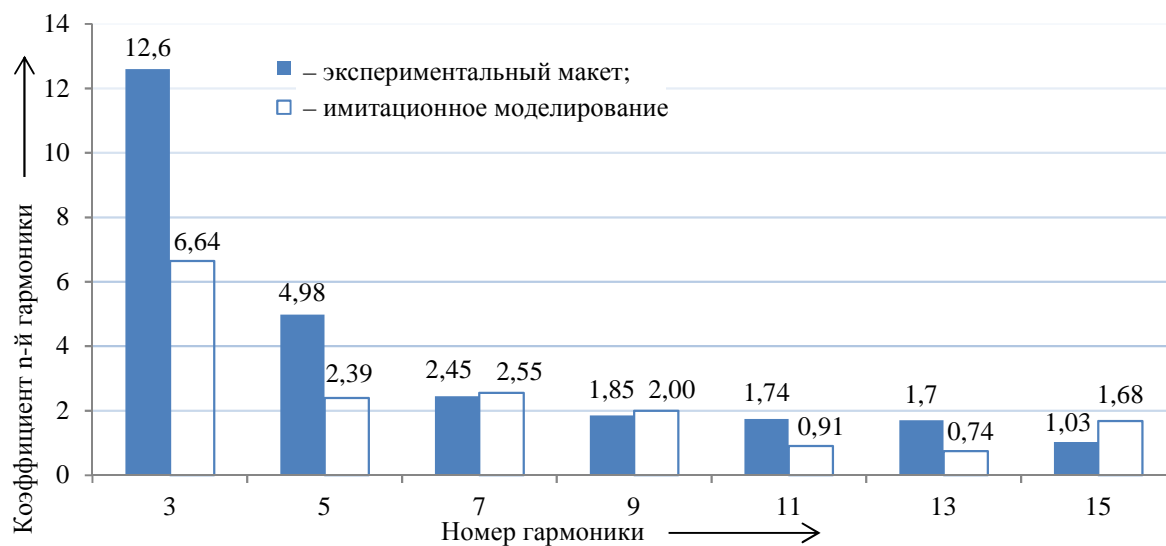


Рисунок 6 – Спектральный состав напряжения на электротяговой нагрузке

Более существенное расхождение в спектре наблюдается при низких частотах. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения THD для экспериментального макета составил 14,1 %, а для имитационной модели – 8,0 %. Необходимо отметить, что электротяговая нагрузка при этом является линейной как для экспериментального макета, так и для имитационной модели, поэтому появление гармонических составляющих напряжения в спектре обусловлено работой ШИМ без синус-фильтров. Расхождение в значениях THD объясняется неполным совпадением подобранных параметров элементов электрической цепи при разработке физической модели СТЭ переменного тока с вольтодобавочным трансформатором по сравнению с параметрами имитационной модели, а также повышенной неопределенностью измерений из-за использования «Энерготестера-ПКЭ-А» в нетиповом режиме, при котором измеряемое напряжение оказывается существенно меньше номинального. Указанные недостатки могут быть скорректированы в рабочем порядке при эксплуатации разработанного экспериментального стенда.

Таким образом, разработанная физическая модель подтвердила свою работоспособность и позволила доказать также работоспособность технологии управления уровнем напряжения в СТЭ переменного тока путем применения вольтодобавочного трансформатора. Результаты исследований, выполненных на экспериментальном макете, хорошо согласуются с данными, полученными путем имитационного моделирования СТЭ переменного тока в программном комплексе SimInTech. Таким образом, было еще раз подтверждено, что управляемые вольтодобавочные трансформаторы позволяют эффективно регулировать уровень напряжения на шинах тяговой подстанции и в тяговой сети.

*Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-29-00346 по теме «Применение бустерных трансформаторов с тиристорным управлением для повышения пропускной способности и энергоэффективности участков железных дорог переменного тока».*

### Список литературы

1. Cheremisin, V. T., Nikiforov, M. M., & Ushakov, S. Y. (2018, October). Assessment of train traction electric energy losses. *In 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602528.
2. Незевак, В. Л. Применение статических компенсаторов и генераторов реактивной мощности при построении инновационной системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2024. – С. 392–399. – EDN WKLBET.
3. Агунов, А. В. Режимы работы комбинированной фильтрокомпенсирующей установки на посту секционирования / А. В. Агунов, А. А. Карабанов, А. В. Ковтун. – Текст : непосредственный // Eltrans-2023 : сборник трудов международного симпозиума / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург : ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. – С. 15–18. – EDN UDFVLP.
4. Переключаемая двухступенчатая фильтрокомпенсирующая установка на посту секционирования тяговой сети железных дорог переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. Е. Дулепов, В. Л. Осокин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2023. – № 1-3. – С. 2–7. – EDN XXPEXK.
5. Незевак, В. Л. Разработка имитационной модели для исследования режимов работы системы накопления электроэнергии при регулировании уровня напряжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов междунар. науч.-практ. конф. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2024. – С. 52–56. – EDN NNTXUT.

6. Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85. – EDN TUOYML.

7. Герман, Л. А. Продольная емкостная компенсация для повышения пропускной способности системы тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, К. С. Субханвердиев. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2022. – № 11. – С. 56–63. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-11-56-63. – EDN ZCQLVI.

8. Чекулаев, В. Е. Продольная компенсация повысит количество и качество электроэнергии на участках переменного тока / В. Е. Чекулаев, В. Ю. Бекренев. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2013. – № 7 (679). – С. 46–47. – EDN QCGTZV.

9. Косарев, А. Б. Электромагнитные процессы в системе тягового электроснабжения с МФ ВДТ при включении его вольтодобавочной обмотки в отсасывающую линию / А. Б. Косарев, М. В. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 15–20. – EDN VWSLVL.

10. Косарев, Б. И. Система тягового электроснабжения переменного тока с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами / Б. И. Косарев, Д. В. Сербиненко, М. В. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – № 1. – С. 13–18. – EDN PVEAHR.

11. Власов, С. П. Дополнительные возможности вольтодобавочного трансформатора / С. П. Власов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 26–30. – EDN WXCUGB.

12. Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е. Н. Соснина, А. А. Асабин, А. А. Кралин, Е. В. Крюков. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей / Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. – С. 132–136. – EDN ZCGCMR.

13. Климаш, В. С. Основы теории трансформаторных подстанций с вольтодобавочными регулирующими и компенсирующими устройствами / В. С. Климаш, Д. В. Пименов. – Текст : непосредственный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2014. – Т. 1. – № 3 (19). – С. 17–29. – EDN SXLVDX.

14. Ли, В. Н. Система автоматического управления устройством снижения уравнительного тока в тяговой сети / В. Н. Ли, Ю. А. Константинова, А. М. Константинов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2021. – № 3 (70). – С. 93–98. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-93-98. – EDN KVYYUR.

15. Комяков, А. А. Экспериментальное определение внешних характеристик тяговых подстанций переменного тока для выбора параметров активных устройств системы тягового электроснабжения / А. А. Комяков, В. А. Тарасевич. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 2. – С. 5–17. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-02-5-17. – EDN FKPLHN.

16. Komyakov, A., Tarasevich, V., & Bartel, L. (2024, May). Simulation Modeling of a Booster Transformer Operation in the Railway Traction Power Supply System. In 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (pp. 337-341). IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553917.

17. Komyakov, A., Nikiforov, M., Tarasevich, V., Bartel, L. (2024). Booster Transformers Energy Performance Assessment in the Traction Power Supply System of Railway Transport. In: S. Shmaliy, Y. (eds) 8th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE2024). CCIE 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1252. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-6934-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-97-6934-6_1).

18. Бартель, Л. А. Разработка математической модели бустерного трансформатора для системы тягового электроснабжения переменного тока / Л. А. Бартель, В. И. Иванченко. –

Текст : непосредственный // ИТ. Наука. Креатив : материалы международного форума. В 5 томах. Том 1. Автоматизация, мехатроника, информационные технологии. – Москва : Колос-с, 2024. – С. 7–12. – EDN AFVORK.

## References

1. Cheremisin, V. T., Nikiforov, M. M., & Ushakov, S. Y. (2018, October). Assessment of train traction electric energy losses. *In 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602528.
2. Nezevak V.L. [The use of static compensators and reactive power generators during construction innovative traction power supply system]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoi konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of the scientific conference]. Omsk, 2024, pp. 392-399. EDN WKL BET. (In Russian).
3. Agunov A.V., Karabanov A.A., Kovtun A.V. [Modes of operation of the combined filter compensating unit at the sectioning station]. *Eltrans – 2023 : sbornik trudov XI mezhdunarodnogo simpoziuma* [Eltrans – 2023 : proceedings of the XI International Symposium]. Saint Petersburg, 2023, pp. 15-18. EDN UDFVLP. (In Russian).
4. German L., Serebryakov A., Dulepov D., Osokin V. Switching two-stage filter compensating installation at the sectioning station of railways traction network of alternating current. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2023, no. 1-3, pp. 2-7. EDN XXPEXK. (In Russian).
5. Nezevak V.L. [Development of a simulation model to study the operating modes of an electric power storage system when regulating the voltage level]. *Issledovanie i razvitie relsovogo i avtomobilnogo transporta : sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Research and development of rail and road transport : proceedings of the International Scientific and Practical conference]. Ekaterinburg, 2024, pp. 52-56. EDN NNTXUT. (In Russian).
6. Garanin M.A., Blinkova S.A. The traction power supply system modeling using the energy storage. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2023, no. 2 (90), pp. 85-90. DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85. EDN TUOYML. (In Russian).
7. German L.A., Subkhanverdiev K.S. Series capacitive compensation to increase the railway traction power supply system transmission capacity. *Elektrichestvo – Electricity*, 2022, no. 11, pp. 56-63. DOI 10.24160/0013-5380-2022-11-56-63. EDN ZCQLVI. (In Russian).
8. Chekulaev V.E., Bekrenev V.Yu. Longitudinal compensation will increase the quantity and quality of electricity in AC sections. *Lokomotiv – The locomotive*, 2013, no. 7 (679), pp. 46-47. EDN QCGTZV. (In Russian).
9. Kosarev A., Alekseenko M. Electromagnetic processes in the system of traction power supply system with MF BT at plugging of his booster winding in a railway power transmission line. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2016, no. 2, pp. 15-20. EDN VWSLVL. (In Russian).
10. Kosarev B.I., Serbinenko D.V., Alexeenko M.V. Traction power supply system AC multipurpose booster transformer. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2013, no. 1, pp. 13-18. EDN PVEAHR. (In Russian).
11. Vlasov S.P. Additional features of the booster transformer. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2016, no. 9, pp. 26-30. EDN WXCUGB. (In Russian).
12. Sosnina E.N., Asabin A.A., Kralin A.A., Kryukov E.V. [Thyristor regulator of the magnitude and phase of the surge voltage in 6-10 kV distribution electric networks]. *Aktualnyie problemyi elektroenergetiki : sbornik nauchno-tekhnicheskix statei* [Current problems of the electric power

industry : a collection of scientific and technical articles]. Nizhniy Novgorod, 2017, pp. 132-136. EDN ZCGCMR. (In Russian).

13. Klimash Mr.V., Pimenov Mr.D. BASIC Theory of transformer sub-stations equipped with controlling and compensating booster facilities. *Uchenyie zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta – Scientific notes of Komsomolsk-on-Amour state technical university*, 2014, vol. 1, no. 3 (19), pp. 17-29. EDN SXLVDX. (In Russian).

14. Li V.N., Konstantinova Yu.A., Konstantinov A.M. Automatic control system of device for reducing equalizing current in traction network. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2021, no. 3 (70), pp. 93-98. DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-93-98. EDN KVYYUR. (In Russian).

15. Komyakov A., Tarasevich V. Experimental determination of external characteristics of AC traction substations for selection of parameters of active devices of traction power supply system. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2024, no. 2, pp. 5-17. DOI 10.20295/2223-9987-2024-02-5-17. EDN FKPLHN. (In Russian).

16. Komyakov, A., Tarasevich, V., & Bartel, L. (2024, May). Simulation Modeling of a Booster Transformer Operation in the Railway Traction Power Supply System. In 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (pp. 337-341). IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553917.

17. Komyakov, A., Nikiforov, M., Tarasevich, V., Bartel, L. (2024). Booster Transformers Energy Performance Assessment in the Traction Power Supply System of Railway Transport. In: S. Shmaliy, Y. (eds) 8th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE2024). CCIE 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1252. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-6934-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-97-6934-6_1).

18. Bartel L.A., Ivanchenko V.I. [Development the booster transformer mathematical model for AC traction power supply system]. *It. Nauka. Kreativ. Materialy I mezhdunarodnogo foruma: v 5-ti tomah. tom 1. Avtomatizatsiya, mexatronika, informacionnyie texnologii. Omsk, 14–16 maya 2024 goda* [IT. Science. Creative. Materials of the I International Forum: in 5 volumes. Volume 1. Automation, mechatronics, information technology. Omsk, May 14-16, 2024]. Moscow, Kolos-s Publishing and Bookselling Center 2024, pp. 7-12. EDN AFVORK. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### Иванченко Владимир Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (913) 602-60-30.

E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

### Тарасевич Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Komyakov Aleksandr Anatol'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (904) 322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### Ivanchenko Vladimir Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Phone: +7 (913) 602-60-30.

E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

### Tarasevich Viktor Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: viktortarasevich5665@gmail.com

**Стасюк Андрей Николаевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Заведующий лабораториями кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: andsta1@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Разработка физической модели системы тягового электроснабжения переменного тока с управляемым вольтодобавочным трансформатором / А. А. Комяков, В. И. Иванченко, В. А. Тарасевич, А. Н. Стасюк. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 43 – 54.

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

Postgraduate student of the department «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: viktortarasevich5665@gmail.com

**Stasyuk Andrey Nikolaevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Head of Laboratories of the department «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: andsta1@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komyakov A.A., Ivanchenko V.I., Tarasevich V.A., Stasyuk A.N. AC traction power supply system with a controlled booster transformer physical model development. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 43-54. (In Russian).

УДК 629.4.015

**И. И. Галиев, В. А. Николаев, В. Н. Ушак, А. Н. Смалев**

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

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Аннотация.** В статье рассматриваются возможности решения проблемы повышения конкурентоспособности контейнерных перевозок по железным дорогам Сибирского региона. Отмечено, что доля железных дорог России в мировом грузообороте по транспортному коридору, связывающему страны Европы и Азии, крайне мала, а увеличение их пропускной способности осуществляется в основном путем модернизации инфраструктуры либо повышения массы поезда. Одним из основных ограничений для существенного прорыва в данном вопросе остаются низкие скорости движения грузовых поездов из-за технического несовершенства ходовой части грузовых вагонов, оснащенных устаревшей тележкой модели 18-100 и ее модификациями. Весомый вклад в проблему вносят климатические условия дорог Восточного полигона, повышающие модуль упругости пути и вызывающие морозное пучение подпального основания. Вследствие этого применение технических решений, используемых в современных образцах зарубежной железнодорожной техники, не в полной мере обеспечивают эффективность инвестиций в российских условиях. Авторы предлагают подход, предназначенный для создания эффективного рессорного подвешивания, основанного на принципе компенсации внешних возмущений, как принципиально новых систем, так и модернизации существующих. Проведено сравнение показателей динамических качеств вагонов с типовой тележкой 18-100 и тележкой, оснащенной компенсирующим устройством в буксовом узле. Математическое моделирование таких систем показало, что на экономически выгодной скорости 100 км/ч вертикальные ускорения кузова вагона с компенсирующим устройством снижаются практически в два раза. Для проверки адекватности теоретических исследований согласно критериям подобия были построены физические модели рассматриваемых систем. В результате сравнительных испытаний было установлено снижение вертикальных ускорений в 2–2,5 раза.

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки и повышение конкурентоспособности железных дорог, рессорное подвешивание, компенсация внешних возмущений, неровность пути, математическое моделирование, физическое моделирование, вертикальные ускорения.

Ilkham I. Galiev, Victor A. Nikolaev, Victor N. Ushak, Alexander N. Smalev

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

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF CONTAINER TRANSPORTATION BY RAILWAY TRANSPORT

**Abstract.** *The article considers the possibilities to improve the competitiveness of container transportation by railways in the Siberian region. Attention is focused to the extremely small share of Russian railways in the global freight turnover along the transport corridor connecting the countries of Europe and Asia, and the increase in their capacity is carried out mainly by upgrading infrastructure or raising the weight of the train. One of the main limitations for a significant breakthrough in this issue remains the low speeds of freight trains due to the technical imperfection of the undercarriage of freight cars equipped with an outdated 18-100 model bogie and its modifications. A significant contribution to the problem is made by the climatic conditions of the Eastern railway range, which increase the modulus of railway elasticity and cause frosty heaving of the subshedral base. As a result, the use of technical solutions used in modern samples of foreign railway equipment does not fully ensure the effectiveness of investments in Russian conditions. The authors propose an approach to create an effective spring suspension based on the principle of the external disturbances compensation, both for fundamentally new systems and modernization of existing ones. The dynamic qualities indicators of wagons with a standard 18-100 bogie and a bogie with a compensating device in the axle box were compared. Mathematical modeling of such systems presented the reduction of the wagon body vertical accelerations by almost two times at an economically advantageous speed of 100 km/h, when a compensating device is implemented. To verify the adequacy of theoretical studies according to the similarity criteria, physical models of the systems were constructed. As a result, a 2-2.5-fold decrease in vertical accelerations was established.*

**Keywords:** *container transportation and improving the competitiveness of railways, spring suspension, compensation of external disturbances, unevenness of the track, mathematical modeling, physical modeling, vertical accelerations.*

В настоящее время мировые тенденции развития конкуренции на транспортном рынке требуют существенного повышения технического и технологического уровня российских железных дорог, которым крайне необходимо резко ускорить свое развитие, чтобы сократить разрыв со своими зарубежными и внутренними конкурентами – грузовым автомобильным транспортом и Северным морским путем. Несмотря на благоприятное географическое расположение Транссиба существующая маршрутная скорость контейнерных поездов по Транссибу составляет 2500 км за двое суток, вследствие чего доля мирового грузооборота перевозимых контейнеров из стран Юго-Восточной Азии в Европу составляет немногим более 1 %.

В настоящее время транспортировка контейнеров осуществляется фитинговыми платформами, позволяющими перевозить один 40-футовый контейнер или два стандартных 20-футовых контейнера. Такие вагоны производятся Барнаульским и Канашским вагоноремонтными, а также Тихвинским вагоностроительными заводами и рядом других организаций. Часть этих платформ имеет короткую базу 9720 мм, другие – 13400 мм. В эксплуатации используется и контрейлерная платформа для перевозки автопоездов, конструкций и резервуаров – модель 13-5205, на тележках 18-100 с базой 19500 мм, грузоподъемность 67,5 т.

Проблема повышения провозной способности железных дорог решается путем увеличения массы поезда за счет организации движения сдвоенных поездов и ходовой скорости его движения, при этом интервал движения поездов, например, по Транссибу составляет 8 минут, что близко к предельному значению по условиям работоспособности системы энергоснабжения на электрифицированных участках и обеспечения безопасности движения.

Вследствие того, что вагон и железнодорожный путь представляют собой единую механическую колебательную систему и при этом процесс взаимодействия подвижного состава и пути носит характер положительной обратной связи, т. е. несовершенства подвижного состава и пути негативно влияют на динамическую нагруженность подвижного состава и пути, наблюдается тенденция к дальнейшему развитию дефектов рельсов и отказов узлов ходовой части подвижного состава, увеличению количества отступлений от норм содержания пути и росту числа ограничений ходовой скорости на участках.

Следствием наличия инфраструктуры, не отвечающей современным требованиям, являются существенный рост числа ограничений скоростей движения поездов, снижение ходовой скорости и надежности доставки грузов, снижение уровня безопасности перевозок, большие затраты энергоресурсов на тягу поездов, обусловленные несовершенством ходовых частей грузовых вагонов, оснащенных физически и морально устаревшей тележкой модели 18-100 – ухудшенным аналогом созданной еще в США в 1924 г. тележки Барбера [1].

Несовершенства этой тележки:

большие зазоры между буксой и челюстями боковой рамы тележки 18-100 как в продольном (вдоль оси пути), так и в поперечном направлениях, что приводит к параллелограммированию тележки в плане и соответствующему увеличению угла набегания гребня колеса на рельс. Это повышает интенсивность износа гребней колес и бокового износа головок рельсов, увеличивает сопротивление движению поезда и расход энергии на его тягу;

недостаточный статический прогиб рессорного комплекта в порожнем состоянии вагона и недостаток диссипативных сил в рессорном комплекте, что в совокупности служит причиной возникновения интенсивных колебаний виляния и боковой качки, вынуждает ограничивать скорость порожних составов в кривых участках пути радиусом менее 600 м до 60 км/ч. Это снижает пропускную способность участков железных дорог.

Длиннобазная фитинговая платформа модели 13-6903 с увеличенной грузоподъемностью 74,5 т, производимая Тихвинским ВСЗ, оснащена тележкой модели 18-9855. В этой тележке в груженом состоянии вагона жесткость рессорного комплекта составляет 447 кгс/мм, угол наклона фрикционных клиньев равен 55°. Эти факторы служат причиной формирования больших сил сухого трения в узле «клин – фрикционная планка», что в совокупности с большей по сравнению с тележкой 18-100 необрессоренной массой увеличивает воздействие на путь и негативно влияет на плавность хода и, следовательно, на сохранность перевозимых грузов при высоких скоростях движения. Наличие скользунгов постоянного контакта является основной причиной износа гребней колес и боковой грани головок рельсов в кривых участках пути.

В статье [2] отмечено, что увеличение осевой нагрузки приводит к снижению работоспособности рельсов. Так, при движении грузовых поездов по участку Среднесибирская – Входная поездов с осевой нагрузкой 215 кН (21,94 тс/ось) и доле кривых на участке, равной 2,6 %, при  $\gamma$ -процентном ресурсе рельсов, равном 92,5 %, пропущенный тоннаж до отказа составит 923 млн т брутто, следовательно, дальнейшая эксплуатация приведет к риску изломов рельсов под поездом.

Как показывает практика, при эксплуатации поездов повышенной массы при доле 20 % грузовых поездов с осевыми нагрузками 25 тс в суточном пакете следует ожидать снижения контактно-усталостной долговечности рельсов на 3 – 4 % [3].

Рост интенсивности эксплуатации железнодорожного пути и повышение силового воздействия на него со стороны подвижного состава приводят к увеличению повреждаемости не только рельсов, но и других компонентов верхнего строения, в частности, подкладок рельсового скрепления типа КБ. Как показано в работе [4], за период между капитальными ремонтами пути после пропуска 450 – 500 млн т брутто груза вследствие недостаточной усталостной прочности количество изломанных подкладок составляет 180 – 220 шт./км пути, что значительно увеличивает эксплуатационные расходы на его содержание.

Применение тележек моторвагонных поездов семейства ЭД4 (ЭД9) в контейнерных маршрутах в первую очередь ограничено суровыми климатическими условиями зимнего периода эксплуатации на дорогах Дальневосточного региона, Байкало-Амурской магистрали, Восточной Сибири и других участков Транссиба, негативно влияющими прежде всего на работоспособность гидравлических гасителей колебаний рессорного подвешивания тележек, а также их достаточно высокой стоимостью.

Как показывает практика, при низких температурах увеличиваются зазоры в стыках рельсов (при минусовых температурах свыше 30°С – до 28 – 30 мм), что приводит к росту импульсного воздействия на колесную пару в зоне стыка рельсов. Ударное воздействие

твердых колес, обусловленное наличием выщербин и ползунов, создает кумулятивный дробовой эффект [5], снижающий усталостную выносливость рельсов и узлов ходовой части грузового вагона. В 2023 г. допущено 145 случаев изломов рельсов, из них максимальное количество – на дорогах Восточного полигона. При этом себестоимость текущего содержания одного километра пути по сети дорог ОАО «РЖД» по результатам работы за 2023 г. увеличилась на 112,5 % [6].

Большую роль в процессе взаимодействия колеса и рельса играют климатические условия дорог Восточного полигона – вечномерзлые грунты отдельных участков БАМа, повышающие модуль упругости пути, и морозное пучение подшпального основания. Морозное пучение и последующее оттаивание – важные факторы, формирующие неровности верхнего строения пути и влияющие на эксплуатационную надежность железных дорог [7].

В настоящее время в локомотивном и вагонном парках российских железных дорог эксплуатируется слишком мало единиц подвижного состава – магистральных грузовых локомотивов и вагонов для перевозки контейнеров с конструкционной скоростью 140 км/ч, что сдерживает развитие ускоренных контейнерных перевозок, в первую очередь по международному транспортному коридору «Восток – Запад». Низкая ходовая скорость движения грузовых поездов также препятствует развитию скоростного и высокоскоростного движения вследствие обращения пассажирских и грузовых поездов по одним и тем же участкам пути.

В связи с этим крайне необходимо в рамках реализации национального проекта по развитию железнодорожного транспорта Российской Федерации и Концепции комплексного развития контейнерных перевозок ОАО «РЖД» разработать и внедрить инновационный подвижной состав.

Следует отметить, что в конструкциях тележек во многом повторяются технические решения прежних лет, принятые за рубежом. Они имеют различное устройство буксы или адаптера, износостойкого элемента буксового узла, боковой рамы, пружин подвешивания, фрикционных клиньев, надрессорной балки, боковых скользунов и унифицированы только по колесным парам, кассетным подшипникам и тормозной рычажной передаче. Новые решения связаны в основном с некоторым увеличением статического прогиба кусочно-линейного рессорного подвешивания (в порожнем состоянии – до 18 – 20 мм, в груженом – до 68 – 70 мм), с введением упругих скоб и полиуретановых элементов между буксой и боковой рамой тележки, износостойких элементов в узлах трения (между пятником и подпятником, а также амортизаторов беззазорных скользунов постоянного контакта). Общей тенденцией в таких тележках является некоторое увеличение статического прогиба рессорного подвешивания, применение сменных износостойких элементов и совершенствование конструкций скользунов.

Здесь необходимо отметить, что дальнейшее увеличение статического прогиба рессорного комплекта может привести к повышению вероятности выжимания вагона в кривом участке пути в переходных режимах движения поезда.

Один из самых известных и авторитетных ученых в области динамики подвижного состава профессор М. Ф. Вериго в свое время отмечал: **«Работа над новой двухосной тележкой должна быть направлена прежде всего на создание надбуксового рессорного подвешивания, у которого была бы обеспечена высокая стабильность динамических параметров, а также полная и надежная связевость рам тележек»** [8]. Именно по такой концепции создана тележка ДП-3 (дружественная к пути) [9]. Необрессоренная масса тележки ДП-3 на 1,1 т меньше, чем у тележки 18-100, горизонтальные ускорения груженого вагона с такой тележкой в 2,36 раза меньше, чем у вагона-эталона, и в 1,5 раза меньше, чем у вагона-эталона в кривой радиуса 1000 м. Однако показатели ее вертикальной динамики практически сопоставимы с показателями вагона-эталона с тележкой 18-100, поэтому тележка ДП-3 не нашла широкого применения.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В СССР работы по созданию тележки с уменьшенной необрессоренной массой и с надбуксовым рессорным подвешиванием начались еще в 60-х гг. прошлого века. Уралвагонзаводом были созданы тележки УВЗ-1, УВЗ-2, УВЗ-4, УВЗ-6 и УВЗ-6КМ. Вследствие значительной жесткости такого подвешивания, обусловленного регламентированным требованием на разность высот автосцепок сцепляемых вагонов, такие тележки не нашли применения по причине высокого напряженно-деформированного состояния рам тележек в условиях эксплуатации.

Таким образом, традиционные подходы к созданию новой тележки грузового вагона на основе применения типовой ее структуры, модернизации существующей или копирования лучших зарубежных образцов не в полной мере отвечают современным требованиям. **«Создать тележку нового поколения, обеспечивающую увеличение пропускной и провозной способности железных дорог, можно только на основе новых идей и технологий»** [10].

К таким новым идеям и технологиям и относятся отмеченные новые подходы и методы создания эффективного рессорного подвешивания подвижного состава, основанные на принципе компенсации внешних возмущений. На этом принципе в ОмГУПСе на основе многолетних исследований разработаны системы виброзащиты человека-оператора и подвижного состава.

Для оценки эффективности предлагаемого способа сравним показатели динамических качеств вагона-платформы фитингового типа с тележкой 18-100 и вагона, оснащенного компенсирующим устройством в буксовой ступени рессорного подвешивания, установленном параллельно типовому упругому элементу в этой ступени с учетом габаритных, прочностных и функциональных ограничений, накладываемых на его параметры [11]. Силовые характеристики таких систем обрессоривания приведены на рисунке 1.

В порожнем режиме движения нагружены внутренние пружины рессорного комплекта буксовой ступени, в груженом – при наезде на неровность пути включается в работу компенсирующее устройство, расположенное на боковой раме тележки. При этом учитывается необходимый запас конструктивного прогиба пружин.

При формировании математической модели колебаний системы «вагон – путь» полагаем, что зазоры между упорами фитинговой платформы и размещенными на ней 20-футовыми контейнерами отсутствуют. Упругие свойства (изгиб и кручение) рамы платформы не учитываются.

Система уравнений, описывающих колебания узлов системы «вагон – путь», в векторно-матричной форме записи имеет вид:

$$M \ddot{\bar{q}}_j + B \dot{\bar{q}}_j + C \bar{q}_j = \bar{Q}_j,$$

где  $\bar{q}_j$  – вектор соответствующих обобщенных координат узлов экипажа;

$M$ ,  $B$  и  $C$  – матрицы инерционных, диссипативных и упругих коэффициентов системы соответственно;

$\bar{Q}_j$  – вектор обобщенных сил.

В результате численного интегрирования уравнений вертикальных колебаний вагона-платформы с типовым рессорным подвешиванием тележек и вагона с буксовым обрессориванием, оснащенный компенсирующим устройством, получены зависимости максимальных вертикальных ускорений подпрыгивания кузовов вагонов с типовой и предлагаемой схемами обрессоривания экипажей, приведенные на рисунке 2.

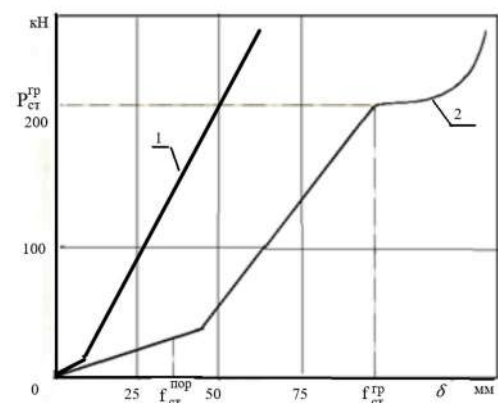


Рисунок 1 – Силовые характеристики вагонов с типовой (1) и с предлагаемой (2) схемами обрессоривания

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

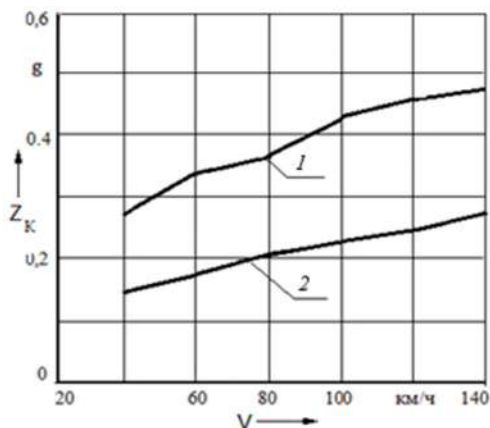


Рисунок 2 – Максимальные вертикальные ускорения кузова груженого вагона: 1 – вагон с типовой тележкой; 2 – вагон с буксовой ступенью обрессоривания тележки, оснащенной компенсирующим устройством

Установлено, например, что на экономически выгодной скорости 100 км/ч вертикальные ускорения кузова в 1,94 раза меньше чем у вагона с типовой тележкой, что улучшает показатели динамических качеств вагона и, следовательно, положительно сказывается на сохранности перевозимых грузов.

Заметим здесь, что при обычном типовом рессорном подвешивании, структура которого состоит из упругого элемента (комплекта пружин) и гасителя колебаний, для достижения таких высоких показателей вагона-платформы его статический прогиб должен достигать величины 0,256 м, что совершенно невозможно осуществить в силу имеющегося жесткого ограничения на разность высот автосцепок сцепляемых вагонов.

Для проверки адекватности выполненных теоретических исследований построена отвечающая критериям подобия физическая модель системы «вагон – путь» с двумя вариантами системы обрессоривания – типовой схемой обрессоривания буксовой ступени и схемой обрессоривания, содержащей компенсирующее устройство. Часто встречающийся неравномерный прокат по кругу катания колеса учтен в виде эксцентриситета величиной 1,8 мм.

Осциллограммы сравнительных испытаний, выполненных согласно критериям подобия физической модели с типовой схемой обрессоривания и физической модели с компенсирующим устройством в буксовой ступени обрессоривания ходовой части экипажа, движущегося со скоростью 90 км/ч, приведены на рисунках 3 и 4. Возмущающими факторами являются стыковая неровность глубиной 9 мм и эксцентриситет колесной пары.

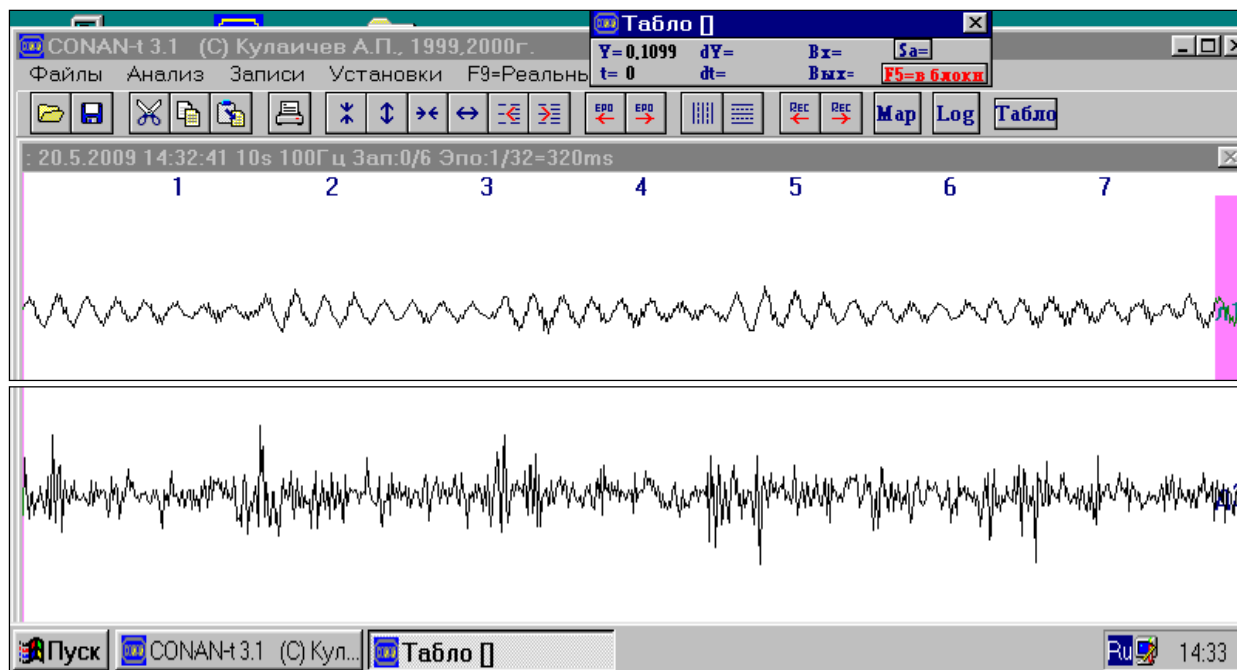


Рисунок 3 – Осциллограммы вертикальных ускорений кузова порожнего вагона (верхняя кривая) и колеса (нижняя кривая) для системы с типовым рессорным подвешиванием

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

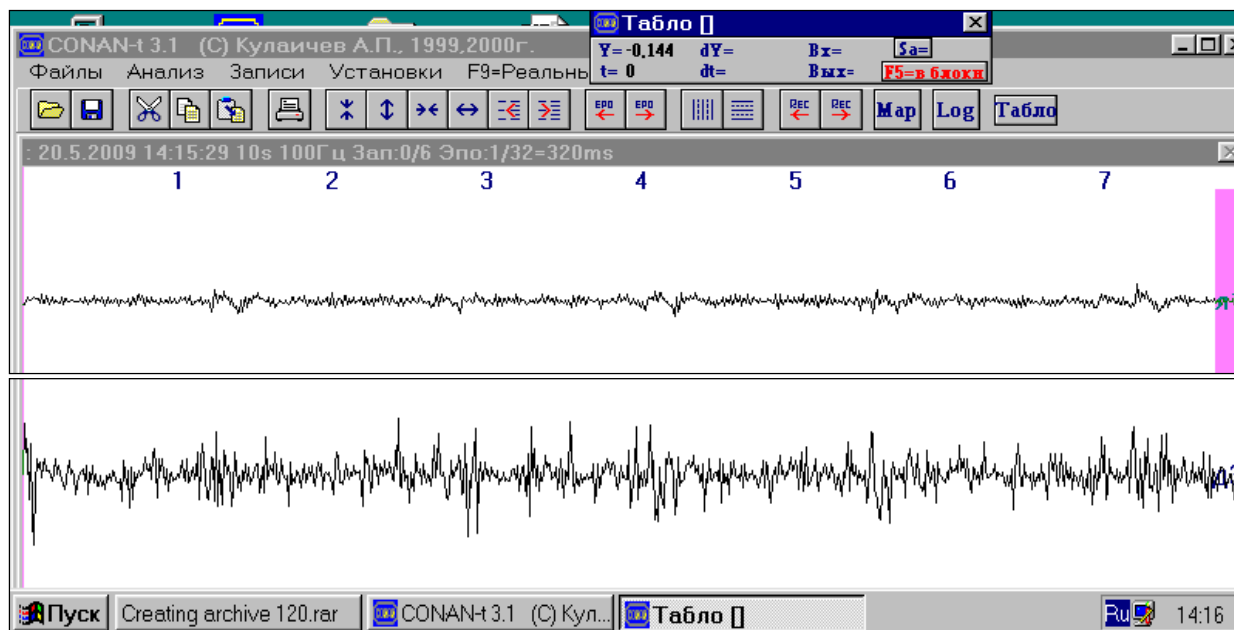


Рисунок 4 – Осциллограммы вертикальных ускорений кузова порожнего вагона (верхняя кривая) и колеса (нижняя кривая) для системы с компенсирующим устройством в буксовой ступени

Ускорения на входе в системы обрессоривания – нижняя кривая на рисунках 3 и 4. Для наглядности в этих случаях коэффициенты усиления каналов, регистрирующих ускорения кузова, подобраны одинаковыми.

Сравнение графиков показывает, что максимальные вертикальные ускорения кузова вагона с предлагаемым рессорным подвешиванием, основанным на принципе компенсации внешних возмущений, в 2,4 раза меньше, чем у вагона с типовой схемой подвешивания.

Описанная конструкция позволяет обеспечить следующее:

- повышение плавности хода фитинговых платформ и сохранности перевозимых грузов;
- уменьшение необрессоренной массы за счет применения буксовой ступени обрессоривания с пониженной динамической жесткостью и снижение воздействия на путь, а также уменьшение эксплуатационных расходов на его содержание;
- снижение динамической нагруженности узлов вагона-платформы в целом;
- увеличение ходовой и маршрутной скоростей движения поездов и повышение эффективности контейнерных перевозок.

## Список литературы

1. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго. – Москва : ПТКБ ЦП МПС, 1997. – 207 с. – Текст : непосредственный.

2. Карпущенко, Н. И. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях / Н. И. Карпущенко, П. С. Труханов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 2 (26). – С. 118–126. – EDN WLBFNH.

3. Влияние величины осевых нагрузок подвижного состава на контактно-усталостную долговечность рельсов / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, О. Г. Краснов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – № 3. – С. 149–156. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-3-149-156. – EDN USSPQM.

4. Герасимов, С. И. Анализ усталостной прочности подкладки рельсового скрепления / С. И. Герасимов, В. М. Тихомиров, А. М. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – Т. 26. – № 5. – С. 198–211. – DOI 10.31675/1607-1859-2024-26-5-198-211. – EDN TPUUFV.

5. Коган, А. Я. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах / А. Я. Коган. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 3. – С. 3–8. – EDN TOLHCB.

6. Залива, Д. В. Анализ работы путевого комплекса в 2023 г. / Д. В. Залива. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2024. – № 3. – С. 2–7. – EDN WQGLDQ.

7. Щепотин, Г. К. Усиление подшпального основания в условиях Сибири / Г. К. Щепотин. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 7. – С. 22–24. – EDN MADKFN.

8. Вериго, М. Ф. О взаимодействии пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 5. – С. 71–74.

9. Ходовые качества грузового вагона на тележках ДП-3 / Е. К. Рыбников, В. В. Березин, А. А. Лунин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2012. – № 2 (18). – С. 59–63. – EDN OXTFRV.

10. Бороненко, Ю. П. Вагоны с увеличенными нагрузками от колес на рельсы – резерв повышения провозной и пропускной способности железных дорог / Ю. П. Бороненко. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 5 (18). – С. 52–55. – EDN JVXYUH.

11. Применение принципа компенсации внешних возмущений для обеспечения безопасности движения грузового поезда / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 2 (21). – С. 90–93. – EDN KTYYSJ.

## References

1. Verigo M.F. *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava v krivyh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnej koles* [The interaction of track and rolling stock in small radius curves and the dealing with lateral wear of rails and wheel ridges]. Moscow, Design and Technological Bureau for Track and Track Machines of the Ministry of Railways Publ., 1997, 207 p. (In Russian).

2. Karpuschenko N.I., Trukhanov P.S. Assessment and forecasting of reliability of rails in various operational conditions. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 2 (26), pp. 118-126. EDN WLBFNH. (In Russian).

3. Kossov V.S., Volokhov G.M., Krasnov O.G., Ovechnikov M.N., Protopopov A.L., Oguenko V.V. Influence of the axial loads of rolling stock on the contact-fatigue life of rails. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2018, vol. 77, no. 3, pp. 149-156. DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-3-149-156. EDN USSPQM. (In Russian).

4. Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Popov A.M. Fatigue strength analysis of rail fastening baseplate. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*, 2024, vol. 26, no. 5, pp. 198-211. DOI 10.31675/1607-1859-2024-26-5-198-211. EDN TPUUFV. (In Russian).

5. Kogan A.Ya. On-track impact by trains with flat-spotted car wheelsets. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2014, no. 3, pp. 3-8. EDN TOLHCB. (In Russian).

6. Zaliva D.V. Analysis of the work of the track complex in 2023. *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2024, no. 3, pp. 2-7. EDN WQGLDQ. (In Russian).

7. Schepotin G.K. Strengthening the subshedral base in the conditions of Siberia. *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2021, no. 7, pp. 22-24. EDN MADKFN. (In Russian).

8. Verigo M.F. On the interaction of track and rolling stock. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2001, no. 5, pp. 71-74. (In Russian).

9. Rybnikov E.K., Berezin V.V., Lunin A.A., Charkin V.A., Krivenok V.L., Streha N.R., Korneev A.L. Ride performance of the freight car on bogies DP-3. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog – Railway equipment*, 2012, no. 2 (18), pp. 59-63. EDN OXTFRV. (In Russian).

10. Boronenko Yu.P. Wagons with increased wheel-pair loads on rails are the reserve for increasing the carrying capacity of railways. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2008, no. 5 (18), pp. 52-55. EDN JVXYUH. (In Russian).

11. Galiyev I.I., Nekhayev V.A., Nikolayev V.A., Korenjkov I.I., Kalinina E.S. Application of external disturbance compensation principle to provide train operation safety. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2009, no. 2 (21), pp. 90-93. EDN KTYYSJ. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, советник при ректорате ОмГУПС, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

### Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

### Ушак Виктор Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: UshakVN@omgups.ru

### Смалев Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: SmalevAN@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Повышение эффективности контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте / И. И. Галиев, В. А. Николаев, В. Н. Ушак, А. Н. Смалев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 54 – 62.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Galiev Ilkham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, advisor to the rector's office of OSTU, honored scientist of RF, professor of the department «Theoretical and applied mechanics».

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

### Nikolaev Victor Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

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

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

### Ushak Victor Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: UshakVN@omgups.ru

### Smalev Alexandr Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Тел.: +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: SmalevAN@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I.I., Nikolaev V.A., Ushak V.N., Smalev A.N. Improving the efficiency of container transportation by railway transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 54-62. (In Russian).

**А. Буяннэмэх, В. А. Оленцевич, Е. В. Каимов**

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

## **ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ МАНЕВРОВОЙ РАБОТЫ НА ИНФРАСТРУКТУРНОМ КОМПЛЕКСЕ УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

**Аннотация.** В условиях стремительно развивающейся промышленной революции Монголия должна активно применять современные методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия организационно-управленческих решений в технических системах, внедрять инновационные подходы в области информационных технологий, такие как IoT (интернет вещей), «Big Data» (большие данные) и облачные вычисления, способствующие оптимизации производственных процессов и логистических подходов в транспортном секторе страны. В рамках государственной программы долгосрочного развития Монголии «Видение 2050» и в соответствии с действующими руководящими принципами долгосрочной политики государства в области оптимизации работы железнодорожного транспортного комплекса предусмотрено расширение и развитие железнодорожной транспортной инфраструктуры, а также повышение эффективности ее функционирования в условиях стремительного прироста пассажиро- и грузопотока. Подобный вектор стратегического развития направлен на повышение конкурентоспособности железнодорожного сектора на международном транспортном рынке, что является приоритетом при организации работы Единого центра регулирования движения поездов Монголии – структурного подразделения Улан-Баторской железной дороги. Авторами проведено исследование существующей методологии управления и организации маневровой работы на ключевых станциях Улан-Баторской железной дороги. Анализируются статистические данные причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций. Изучен международный опыт применения «умных систем», а также сотрудничества с компаниями-разработчиками информационных систем и технологий в сфере обеспечения безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Представлены некоторые результаты исследования авторов по внедрению интеллектуальной системы производства маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги.

**Ключевые слова:** Улан-Баторская железная дорога, инфраструктурный комплекс, информационные системы и технологии, обеспечение безопасности перевозочного процесса, методологии управления и организации маневровой работы, интеллектуальная система, методы системного анализа, методы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений.

**Arkhit Buyannemekh, Victoriya A. Olentsevich, Evgenii V. Kaimov**

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

## **ISSUES OF APPLICATION OF AN INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM AND THE ORGANIZATION OF SHUNTING WORK ON THE INFRASTRUCTURE THE ULAANBAATAR RAILWAY COMPLEX**

**Abstract.** In the context of the rapidly developing industrial revolution, Mongolia should actively apply modern methods and algorithms of intellectual support for organizational and managerial decision-making in technical systems, introduce innovative approaches in the field of information technology, such as IoT (Internet of Things), Big Data (big data) and cloud computing, contributing to the optimization of production processes and logistics approaches in the country's transport sector. Within the framework of the state program for the long-term development of Mongolia "Vision 2050" and in accordance with the current guidelines of the long-term policy of the state in the field of optimizing the operation of the railway transport complex, it is planned to expand and develop the railway transport infrastructure, as well as increase the efficiency of its functioning in conditions of rapid growth in passenger and cargo traffic. Such a vector of strategic development is aimed at increasing the competitiveness of the railway sector in the international transport market, which is a priority in organizing the work of the Unified Train Traffic Control Center of Mongolia, a structural division of the Ulaanbaatar Railway. The authors conducted a study of the existing methodology of management and organization of shunting work at key stations of the Ulaanbaatar railway. Statistical data on the causes of transport accidents and other events related to violations of traffic safety rules and operation of railway transport taking place during shunting operations are analyzed. The international experience of using "smart systems", as well as cooperation with companies developing information systems and technologies in the field of ensuring the safety of the transportation process in railway transport, has been studied. Some results of the authors' research on the introduction

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

*of an intelligent shunting production system at the Ulaanbaatar Railway infrastructure complex are presented.*

*Statistical data and causes of crashes, accidents, work failures, as well as other safety violations during maneuver operations are analyzed. The international experience of using «smart systems», as well as cooperation with companies developing information systems and technologies in the field of ensuring the safety of the transportation process in railway transport, has been studied. Some results of the authors' research on the introduction of an intelligent shunting production system at the Ulaanbaatar Railway infrastructure complex are presented.*

**Keywords:** *Ulaanbaatar Railway, infrastructure complex, information systems and technologies, ensuring the safety of the transportation process, management methodologies and organization of shunting work, intelligent system, methods of system analysis, methods of intellectual support in making managerial decisions.*

В международной практике принято понятие, что системы производства маневровой работы не только обеспечивают безопасность труда, способствуют более эффективной организации человеческих ресурсов, но также повышают пропускные и перерабатывающие мощности инфраструктурного комплекса железных дорог, ускоряя тем самым продвижение грузопотока [1 – 3].

На инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги (УБЖД) маневровая работа производится в соответствии с технологическим процессом работы железнодорожной станции согласно установленному суточному плану, который должен предусматривать следующее:

- своевременное формирование и отправление поездов;
- своевременную подачу вагонов под грузовые операции и уборку их после окончания грузовых операций;
- наименьшие затраты времени на переработку вагонов на станции и прилегающей инфраструктуре;
- рациональное использование имеющихся маневровых средств и технических устройств;
- бесперебойный прием и пропуск поездов на железнодорожную станцию;
- безопасность движения поездов и работников, связанных с маневровыми передвижениями, сохранность железнодорожного подвижного состава и перевозимого груза [4, 5].

На железнодорожных путях необщего пользования при отсутствии технологического процесса работы железнодорожной станции маневровая работа производится в соответствии с местной инструкцией о порядке обслуживания и организации движения. Данные операции выполняются маневровыми или поездными локомотивами на станционных и специальных путях. Маневровые операции на станции осуществляются под руководством дежурного по станции, который обеспечивает координацию маневров на станции и прочих прилегающих путях. Выполнение нормативных требований осуществляется согласно приказу дежурного по станции на одиночных локомотивах и маневровых транспортных средствах на подготовленных путях. На одном маневровом участке может работать только один маневровый локомотив. При необходимости использования двух и более локомотивов маневровые работы выполняются на параллельных путях. Безопасность подвижного состава при таком варианте маневрирования обеспечивается визуальным контролем станционных путей маневровой бригадой, указания которой должны строго выполняться. Дежурные помощники должны постоянно контролировать маневровые передвижения и работу подвижного состава. Маневровые операции допускаются осуществлять поездными локомотивами, но только при наличии направляющей (локомотивной) бригады. Согласно установленной технологии работы маневровые бригады сменяются с 08:00 до 08:30 и с 20:00 до 20:30 [1, 6].

На железных дорогах Монголии производство маневровых операций осуществляется маневровой бригадой, в состав которой входит четыре человека, при этом в таких странах, как Израиль и Швейцария, где широкое применение получили интеллектуальные системы управления и организации маневровой работы, тот же объем работы выполняется одним – двумя работниками.

В рамках политики государства в области железнодорожного транспорта к 2030 г. общая протяженность железных дорог Монголии должна быть увеличена в 2,96 раза и достигнуть 5683,5 км. С приростом параметров строительства будет иметь место и увеличение объема

перевозок по инфраструктурному комплексу УБЖД, что потребует правильной организации и использования человеческих ресурсов, создания единой системы взаимосвязей в транспортной системе страны, применения современных методов интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений. Реализация указанного комплекса мероприятий позволит повысить уровень конкурентоспособности УБЖД на международном транспортном рынке, что является приоритетом для Единого центра регулирования движения поездов Монголии [6 – 10].

Целью данной статьи является обоснование необходимости применения интеллектуальной системы управления и организации маневровой работой на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги. Применение комплексной системы повышения эффективности работы маневровых локомотивов позволит сократить времени простоя вагонов и одновременной безопасной организации маневровой работы внутри железнодорожной станции на основе информации, получаемой в режиме реального времени.

## **Международный опыт применения интеллектуальных систем управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе железных дорог.**

Примерами применения информационных систем в маневровой работе могут служить:

система «Rail Vision» (Израиль) – система оптимальной организации дистанционной маневровой работы;

электронная система маневровой работа в Харбине (КНР) – используется для оптимизации процессов управления маневровой работой;

автоматизированная сигнализация маневровых локомотивов – тестируется на крупных железнодорожных станциях России, таких как Солнечная и Сочи.

Исследования по применению информационных систем для определения местоположения маневровых локомотивов проводились с участием шести компаний, предоставляющих решения по отслеживанию транспортных средств. Такие компании, как «Гайхам» и «ТТ Tools», имеют значительный опыт установки систем определения местоположения локомотивного парка. Их разработки позволяют в реальном режиме времени определять до 28 различных технических и технологических параметров производства маневровых операций. Кроме того, платформа на основе «облачных технологий» предоставляет возможность мониторинга и оценки эффективности производства маневренной работы.

На крупных железнодорожных станциях России имеется опыт внедрения системы автоматической сигнализации для маневровых локомотивов, анализ ее работы доказал возможность эффективного управления одновременно тремя локомотивами одним оператором. Дальнейшее внедрение данной технологии на одной крупной железнодорожной станции позволит получить экономию более 7 млн руб. /год, а также сократить численность персонала на восемь человек.

Электронная система контроля маневровой работы, применяемая на железных дорогах Китая, на 30 % снижает необходимость человеческого участия и регулярно анализирует основные параметры работы локомотивного парка, что способствует повышению эффективности производства маневровой работы, ускоряет технологические процессы по формированию и отправлению поездов, повышая тем самым перерабатывающую способность станций.

Со II квартала 2020 г., чтобы сравнить и проанализировать интеллектуальные системы, используемые в различных странах, сделать выводы и сотрудничать с развивающимися странами, УБЖД и компания «НТК» в Харбине начали проводить исследования продукта «Интеллектуальная система передачи информации». Система позволяет быстро и безошибочно вести управление и организовывать маневровые операции на основе данных в реальном режиме времени, удобна для подготовки электронной отчетности, предоставляет весь необходимый объем информации работникам, занятым на производстве маневровых работ на территории всей станции и прилегающих участках, через независимую беспроводную сеть с помощью интеллектуального планшета.

С 2013 г. российские и международные ученые и практики занимаются изучением автоматических сигнализаций для управления беспилотными маневровыми локомотивами.

В 2019 г. локомотивы были оснащены специальными устройствами обнаружения препятствий на пути следования (три оптические камеры), что позволило более эффективно и безопасно организовать маневровую работу. Машинист-оператор, который управляет маневровым локомотивом, обнаруживает препятствия (людей, технику, посторонние предметы, дорожный инструмент и т. п.) на расстоянии 100 – 150 м и автоматически снижает скорость движения подвижного состава. В настоящее время данная система тестируется на таких крупных станциях России, как Солнечная, Автово, Орехово-Зуево, Сочи, Адлер, Имеретинский курорт, Челябинск-Главный, Бекасово-Сортировочное, Лужская.

Продукция израильской компании «Rail Vision» успешно прошла испытания на железных дорогах швейцарской компании SBB Cargo и реализуется в ряде европейских стран. Начиная с IV квартала 2020 г. исследовательская группа ECRDP приступила к изучению системы «Оптимизация перехода движения при маневрах», позволяющей дистанционно управлять локомотивами с помощью искусственного интеллекта, определять изменения параметров путевого развития и своевременно обнаруживать препятствия на объектах железного транспорта. Данная система обеспечивает безопасность производства маневровой работы и комфортные условия труда работников, занятых на маневрах [1, 4, 5, 11 – 15].

Международный опыт применения информационных систем и технологий в маневровой работе позволяет сделать вывод о необходимости планирования мероприятий по внедрению интеллектуальных систем управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе УБЖД с целью эффективной организации ее использования и поэтапного развития.

**Эффективность и важность применения интеллектуальных систем управления и организации маневровой работы.** В настоящее время с целью обеспечения эффективного развития железнодорожного сектора Монголии переход на электронные ресурсы управления и организации перевозочного процесса является приоритетной задачей. Применение «умной» маневровой системы обеспечит автоматизацию процесса плана формирования поездов на крупных станциях и электронный контроль суточного плана-графика работы станций УБЖД [8, 16].

Проведенный авторами анализ существующей методологии управления и организации маневровой работы, используемой в железнодорожном секторе Монголии, включает в себя комплекс направлений:

- определение эффективности и безопасности производства маневровых операций на крупных железнодорожных станциях УБЖД;

- диагностика состояния рабочего места маневровой бригады, продолжительности и степени ее загруженности, уровня негативного воздействия на здоровье и окружающую среду района производства маневровых операций;

  - анализ режима труда и отдыха маневровой бригады;

  - расчет величины затрат на социальное обеспечение, охрану труда, заработную плату и надбавок работникам маневровой бригады;

  - порядок обмена информацией и взаимодействия между работниками маневрового района; исследование оборудования, программного обеспечения и технических средств, используемых при производстве маневровых работ;

  - изучение типа маневровых локомотивов и маневровых маршрутов;

  - анализ несчастных случаев и причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций;

  - внутренний аудит работников станций, занятых на производстве маневровых работ;

  - определение испытательных железнодорожных станций и маневровых районов;

  - научные исследования возможности развития инфраструктурного комплекса испытательных железнодорожных станций и маневровых районов (федеральная система электропередачи, первичное, вторичное и третичное электроснабжение, резервы, мощность и т. д.).

В таблице 1 сформулированы ключевые аспекты применения интеллектуальных систем маневровой работы на УБЖД.

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 1 – Ключевые аспекты применения интеллектуальных систем маневровой работы на инфраструктурном комплексе на Улан-Баторской железной дороге

Существующая система производства маневровой работы на инфраструктурном комплексе на Улан-Баторской железной дороге	Применение интеллектуальной системы производства маневровой работы
На станции работает маневровая бригада, состоящая из четырех человек	Работа с рациональной организацией человеческого ресурса (один – два человека)
Повышение объема маневровой работы на следующих железнодорожных станциях, вызванное нарушением плана формирования и маршрутизации грузовых поездов	Создание безопасных условий труда, снижение (исключение) количества аварий, отказов и рисков, фиксируемых при производстве маневровых операций
Система, непригодная для сегодняшних и перспективных эксплуатационных нагрузок на инфраструктурный комплекс железных дорог	Оптимизированное дистанционное управление маневровыми локомотивами в режиме реального времени с использованием передовых технологий на базе искусственного интеллекта
Система документирования и отчетности представлена в бумажном виде	Автоматизированный расчет показателей маневровой работы, обработка и анализ отчетов о работе станции в режиме реального времени
Не имеет режима подключения к автоматизированным ресурсам	Имеет гибкие интерфейсные и протокольные характеристики для подключения к единой центральной железнодорожной информационной системе
Необходимость корректировки статистики по выполнению фактических операций и их параметров с использованием человеческого ресурса (отредактировано работниками станции)	Сокращенные сроки предоставления вышестоящим организациям и пользователям достоверной, развернутой информации

**Анализ причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций.**

Обеспечение безопасности перевозочного процесса, минимизация ошибок, выполнение маневровых работ в установленные сроки – это ответственность маневровой бригады. При производстве маневровой операции важным фактором является слаженность взаимодействия персонала с сигналами и стрелочными переводами, а также эффективное использование информации, переданной маневровой бригадой в реальном режиме времени, что требует высокой квалификации работников, занятых на маневрах, наличия у них высокого уровня знаний и опыта.

Анализ причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта за пять лет по УБЖД показал, что максимальное их количество было зарегистрировано в 2020 г. – 73 причины, из них 22 – при производстве маневровых операций, что составляет 30,14 % общей величины. Также наблюдается постоянный рост показателей на 3 – 5 % по сравнению с предыдущими годами (рисунок 1).

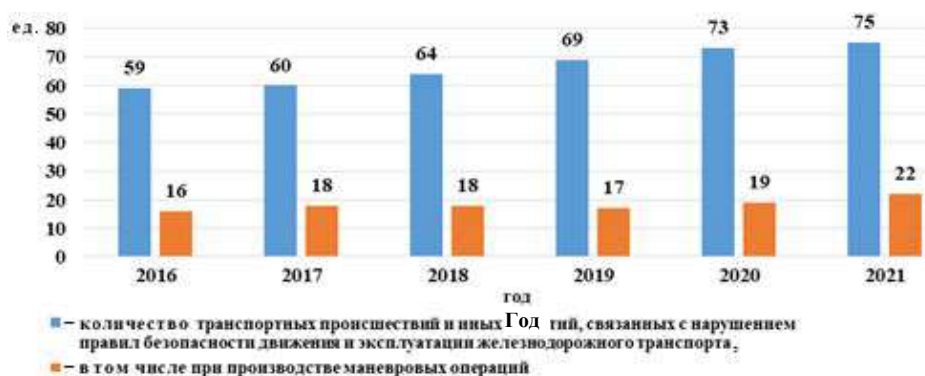


Рисунок 1 – Динамика причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций в 2016 – 2021 гг.

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Согласно статистическим данным ежегодно фиксируется 25 – 32 % от общего количества причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций на железнодорожных станциях УБЖД, что составляет в среднем 22 – 28 случаев, из них:

- 38,4 % – сход подвижного состава;
- 30,7 % – пересечение автодорог;
- 19,2 % – наезд на транспортные средства;
- 7,69 % – заклинивание колесных пар при движении;
- 3,85 % – проезд запрещающего сигнала [1, 6, 7, 16].

На основе статистических данных о железнодорожных транспортных происшествиях УБЖД проведен анализ и определены прогнозные значения вероятности наступления будущих происшествий с учетом изменения грузооборота и изменения параметров транспортной инфраструктуры. С увеличением объемов перевозок на УБЖД, ростом транзитного грузопотока ожидается, что к 2025 г. будет зарегистрировано от 32 до 39 причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций, а к 2030 г. данный показатель будет иметь прирост от 36 до 45 случаев, что составит 31 – 38 % [17 – 23].

Среднее арифметическое количества причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций в 2016 – 2021 гг.,

$$K_{\text{арифм}} = \frac{\sum y}{n} = \frac{16+18+18+17+19+22}{6} = \frac{110}{6} = 18,333, \quad (1)$$

где  $y$  – статистика транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта при производстве маневровых операций по годам анализируемого периода;

$n$  – количество лет в анализируемом периоде.

Среднее геометрическое причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций в 2016 – 2021 гг.,

$$\bar{y}_G = (y_1 \cdot y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \cdot \dots \cdot y_n)^{1/n} = (16 \cdot 18 \cdot 18 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 22)^{1/6} = 18,24. \quad (2)$$

Результаты прогноза до 2030 г. по числовым показателям причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций по УБЖД, определенным методом среднего арифметического [17, 18]:

$$\bar{K}_{\text{арифм}} = \frac{y_n - y_1}{y_1(n-1)} = \frac{22 - 16}{16 \cdot (6 - 1)} = \frac{6}{80} = 0,075; \quad (3)$$

$$y_n = y_1 \cdot \bar{K}_{\text{арифм}} = 22 \cdot 0,075 = 1,65; \quad (4)$$

$$y_{2021} = y_{2021-1} + y_n = 22 + 1,65 = 23,65 = 24; \quad (5)$$

$$y_n = 23,65 \cdot 0,075 = 1,77;$$

$$\dots$$
$$y_{2025} = 24,90 + 1,87 = 26,76 = 27;$$

$$y_n = 26,76 \cdot 0,075 = 2,00;$$

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

$$y_n = 35,70 \cdot 0,075 = 2,68;$$
$$y_{2030} = y_{2030-1} + y_n = 35,70 + 2,68 = 38,4 = 39.$$

Графическое изображение результатов исследования, зарегистрированных с 2016 по 2021 г. и прогнозных (с 2025 по 2030 г.) значений причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта имеющих место при производстве маневровых операций по УБЖД за период с 2016 по 2030 г., представлено на рисунке 2.

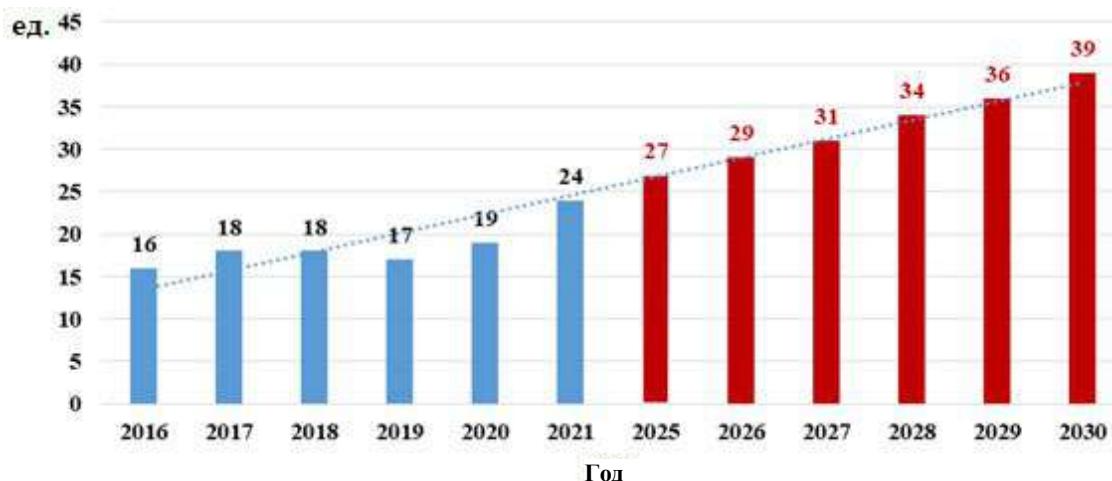


Рисунок 2 – Динамика зарегистрированных (с 2016 по 2021 г.) и прогнозных (с 2025 по 2030 г.) значений причин возникновения транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта при производстве маневровых операций по УБЖД 2016 – 2030 г.

**Оценка целесообразности внедрения интеллектуальной системы управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги.** Для того чтобы железнодорожный сектор имел перспективы конкурировать с другими транспортными отраслями Монголии и в дальнейшем функционировать на уровне требований международного железнодорожного транспорта, необходимо активно развивать ключевые производственные подсистемы и осуществлять переход к промышленной революции. Проведенный анализ позволил выявить следующие недостатки, имеющие место в настоящее время в подсистеме маневровых работ УБЖД:

- не используется программное обеспечение для управления и организации производства маневровых операций;
- несовершенна подсистема производства маневровых работ;
- маневровые работы организуются с помощью ручных сигналов;
- для обмена информацией между маневровыми бригадами используется устаревшее оборудование связи;
- один маневровый локомотив управляется двумя машинистами;
- маневровая бригада состоит минимум из четырех человек;
- отсутствует возможность проводить анализ маневровых работ в реальном режиме времени;
- отсутствуют методы для подготовки электронных отчетов.

Изучив практический опыт применения интеллектуальных продуктов, используемых на международных железнодорожных линиях, необходимо выбрать инновационные, интеллектуальные и безопасные системы и определить способы их локализации в железнодорожной отрасли Монголии. Научно-исследовательские работы проведем на

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

примере управления и организации маневровых операций на инфраструктурном комплексе железнодорожных станций Улан-Батор и Толгойт УБЖД. На данных станциях в основном осуществляется сортировочная работа с грузовыми поездами и местные маневровые операции.

Станция Улан-Батор состоит из девяти путей для приема и отправления поездов, приемо-отправочный парк № 2 состоит из шести путей для приема и отправления поездов, имеется сортировочная горка средней мощности с примыкающим сортировочным парком из девяти путей [1, 7, 16].

Станция Толгойт имеет два приемно-отправочных парка, расположенных сериями «А» и «Б». Парк «А» состоит из семи путей приема и отправления поездов, а парк «Б» – из шести путей приема и отправления поездов. Станция расположена на расстоянии 3,8 км от входного сигнала парка «А» до входного сигнала парка «Б» [1, 7, 16].

Рассмотрим основные характеристики интеллектуальных продуктов, применение которых возможно для повышения уровня управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе УБЖД (таблица 2).

Таблица 2 – Основные характеристики продукта

Показатель продукта	Характеристика (значение) показателя	
	интеллектуальная система маневрирования	система оптимальной организации дистанционной маневровой работы
Страна разработки продукта	Китайское Харбинское железнодорожное бюро	Израильское железнодорожное бюро
Разработчик продукта	ООО «ХТК»	«Рейлвишин» ХХК
Сфера использования продукта	Железнодорожный сектор	Железнодорожный сектор
Тип продукта	Технология автоматизации маневровых операций	Технология удаленной оптимизации маневровых операций
Бренд продукта	RMS-8810S (станция детали) RMS-8810 (бесклассовая станция) RMS-8810E (узловая станция)	RV200
Технологические решения	RMS-Virtual 4G GSM	VIS – WFOV LWIR

Система RMS-8810, разработанная в Китае, настраивается в соответствии с мощностью станции, основана на 4G GSM беспроводной сети и виртуальном облачном сервере, что позволяет передавать данные о производстве маневровых операций без задержек. С помощью данной системы можно организовать маневровую работу на железнодорожной станции с составом из трех человек. Кроме того, в кабине маневрового локомотива установлены контрольный экран и радиостанция, что обеспечивает машинисту все необходимое оборудование для комфортного и безопасного управления локомотивом.

Технология RMS-S850, которая значительно снижает нагрузку на бригаду до одного человека, исследуется в рамках проекта «Устройство для временной установки на вагоне». Установив данное устройство на последний вагон подвижного состава, запланированного для производства маневровой работы, можно в реальном режиме времени контролировать расстояние между маневровым локомотивом и вагонами из кабины локомотива, а также полностью выявлять препятствия на пути движения (таблица 3) [1, 4, 5, 11–15].

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 3 – Характеристика системы RMS-8810

Операция производственного процесса	Характеристика операции производственного процесса
Сбор данных для производства маневровой операции	Данные о маневровых операциях могут собираться оборудованием, установленным на маневровом локомотиве, а данные о маневровых передвижениях могут фиксироваться автоматически с помощью системного терминала
Управление оборудованием	Ручной терминал машиниста и дистанционное управление оборудованием локомотива
Оптимальное позиционирование	Оборудование в маневровом локомотиве под контролем маневрового диспетчера определит оптимальное положение вагона
Передача сигналов о производстве маневровой работы	Между системой отсутствуют помехи при передаче сигналов о производстве маневровой работы и передаче задач на маневровый локомотив
Режим работы	План работы маневровой бригады собирается, обновляется в режиме реального времени и отправляется для выполнения или корректировки задач
Отчет о маневровой работе	Маневровый диспетчер в режиме реального времени вводит план работы по производству маневровой работы в автоматизированную систему станции и готовит отчет
Контроль маневровой работы	При формировании-расформировании состава маневровый локомотив использует оборудование и ручной терминал, который применяется связующим работником, а также устройство, установленное на вагоне, для точного измерения расстояния между вагонами, что обеспечивает безопасное выполнение маневровых операций

Израильская система RV200 позволяет организовывать маневровые работы и управлять ими с участием одного человека, используя специальное устройство дистанционного управления для оптимального управления маневровым локомотивом. «Система оптимальной организации дистанционной маневровой работы» снижает ручной труд при производстве маневровых операций на 80 %, позволяет снизить количество транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, имеющих место при производстве маневровых операций. Маневровый локомотив оснащен оборудованием для раннего обнаружения препятствий на железнодорожном пути.

Возможности системы RV200:

- маневровыми работами может руководить один человек локомотивной бригады;
- организация безопасной и быстрой маневровой работы путем управления маневровым локомотивом дистанционно;
- обнаружение препятствий для движения подвижного состава на железнодорожных путях на расстоянии до 300 м;
- идентификация людей и животных на путях с помощью тепловизионной сенсорной камеры на расстоянии 150 м;
- определение состояния переключателя Cum;
- обнаружение забытых или брошенных предметов и инструментов для содержания инфраструктурного комплекса железных дорог на расстоянии до 120 м;
- возможность обработки электронных отчетов;

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

наличие стандартного интерфейса и протокола подключения к железнодорожному информационному центру и другим подсистемам УБЖД [1, 11–17] (рисунок 3).



Рисунок 3 – Определение запланированного маршрута и обнаружение препятствий (объектов) на пути следования подвижного состава

В таблице 4 представлены основные технические характеристики системы RV200 «Система оптимальной организации дистанционной маневровой работы».

В таблице 5 приведено сравнение вариантов внедрения интеллектуальных систем управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе УБЖД [11, 23 – 25].

Таблица 4 – Характеристика системы RV200

Тип интерфейса	Характеристики	Индикаторы
Механический	Размер – сенсорный блок (SU)	324 × 235 × 294 [мм]
	Размер – аналитическая единица (EE)	86 × 426 × 504 [мм]
	Дисплей	Изображения IAW (настраиваются для каждой платформы)
Температура	Рабочая температура	–20 °C – +55 °C
Электричество	Входное напряжение	Постоянное напряжение 12 В (регулируется для каждой платформы)
	Энергия	< 800W
	Контроль	Порт дисплея (опция HDMI)
	Аудиосистема	На основе видео
Харилцаа холболт	Сеть	Ethernet и Wi-Fi, 3G, LTE (не обязательно)
Диапазон обнаружения	Определение планируемого маршрута	200 м
	Состояние переключателя	50 м
	Обнаружение людей и животных	150 м
	Транспортные средства	300 м
	Тормозной путь	80 м
Стандарты	Экологические условия эксплуатации	Разработан в соответствии со стандартами EN 50155, EN 61373, EN 60529
	Стандарты безопасности	Соответствует EN 50126, EN 50128, EN 50129, EN 12663-1

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 5 – Сравнительная таблица целесообразности внедрения интеллектуальных систем управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги

Показатель	Система организации маневровой работы и управления ею		
	Существующая система Улан-Баторской железной дороги	Интеллектуальная система маневрирования (Китай)	Система оптимальной организации дистанционной маневровой работы (Израиль)
Управление человеческими ресурсами	4 – 6 человек	3 человека	1 человек
Соединение вагонного парка	Немеханизированное, с привязкой к команде маневрового диспетчера	Немеханизированное	Немеханизированное, с привязкой к команде машиниста
Управление маневровым локомотивом	Машинистом из кабины локомотива		Автоматическое
Контроль диапазона окружения	Визуальный локомотивной бригадой	Сменная камера для проверки соединений (1 шт.)	Камера ВИС (1 шт.), тепловая камера (1 шт.), камера проверки соединения
Контроль скорости движения маневрового локомотива	Ручное управление		Дистанционное управление
Составление отчета о маневровой работе	Бумажная отчетность	Электронная отчетность	
Управление маневровой работой со станции	–	Контролируют дежурные по станции в режиме реального времени через экран монитора	
Интерфейсы и протоколы	–	–	Доступ к Центральной железнодорожной информационной системе

В научном исследовании проведен анализ текущего состояния маневровой работы в железнодорожном секторе Монголии. Представлено сравнение существующей системы управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе УБЖД с некоторыми международными маневровыми системами.

Согласно проведенному исследованию текущая ситуация с маневровой работой на УБЖД имеет ряд недостатков:

- отсутствует информационная система производства маневровой работы;
- маневровые операции выполняются механизированным способом;
- для обмена информацией используются устаревшие методы;
- отсутствует возможность анализировать ежедневный график работы и его выполнение в режиме реального времени;
- отчеты о работе маневровой бригады составляются в бумажном виде;
- управленческие и технические решения, направленные на обеспечение безопасности перевозочного процесса, не соответствуют международному уровню.

Выявлено, что применение на инфраструктурном комплексе УБЖД системы «Интеллектуальная система маневрирования» RMS-8810 (Китай) позволит:

- безопасно и эффективно организовывать маневровые операции;
- определять и анализировать показатели и графики сменной работы в режиме реального времени на основе электронных ресурсов;
- в автоматизированном режиме устанавливать значения тяговых параметров работы подвижного состава;

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

– контролировать физическое состояние локомотивной бригады;  
– в автоматическом режиме рассчитывать и анализировать трудозатраты и комплекс финансовых показателей работы железнодорожной станции по производству маневровых операций.

Для установки и наладки данной системы на станциях Улан-Батор и Толгойт УБЖД потребуется \$227 756,57 при условии оснащения станций 18 комплектами программно-технического обеспечения, состоящими из семи подсистем.

Применение на инфраструктурном комплексе УБЖД «Системы оптимальной организации дистанционной маневровой работы» (Израиль) RV200 позволит повысить производительность труда работников железнодорожной станции в 1,5 – 2 раза за счет автоматизации процесса управления и организации маневровой работы. Увеличение загрузки локомотивной бригады на 80 % позволит сократить численность работников до пяти и получить экономию по оплате труда работников железнодорожной станции.

Для установки и наладки данной системы на станциях Улан-Батор и Толгойт УБЖД потребуется \$302 857,33 при условии оснащения станций программно-техническим обеспечением и маневрового локомотива детекторами объектов и датчиками тепла, настроенными на непрерывную работу в любых природно-климатических условиях с программированием маршрута производства маневровой работы.

Для реализации данного проектного решения необходимо сформировать команду, состоящую из монгольских инженеров, ученых и исследователей (железнодорожные организации, компании-разработчики информационных технологий), разработать план внедрения и поэтапного тестирования системы.

### Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 30.09.2018 № 2101-р «Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» // [government.ru](http://government.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://government.ru/docs/34297/> (дата обращения: 01.11.2024).

2. Российские железные дороги // [rzd.ru](http://rzd.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 01.11.2024).

3. Динец, Д. А. Международные транспортные коридоры: перспективы для России / Д. А. Динец, М. В. Конотопов. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы международной научно-практической конференции : в 2 томах / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2018. – Т. 2. – С. 48–53. – EDN UTYXCM.

4. Уманский, В. И. Автоматизация управления технологическими процессами железнодорожного транспорта на базе интеграции методов высокоточного спутникового позиционирования и инерциальной навигации : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)» ; 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Уманский Владимир Ильич ; Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). – Москва, 2012. – 46 с. – Текст : непосредственный.

5. Гершвальд, А. С. Оперативное управление процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте в условиях рыночной экономики : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гершвальд Андрей Самуилович ; Российский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте. – Москва, 2004. – 517 с. – Текст : непосредственный.

6. Правительство Монголии представило программу действий на четыре года // [burunen.ru](http://burunen.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvomongolii-predstavilo-programmu-deystviy-na-chetyre-goda/> (дата обращения: 08.11.2024).

7. Политика долгосрочного развития Монголии: «Видение-2050» // mongolnow.com : сайт. – Текст : электронный. – URL : <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (дата обращения: 01.11.2024).

8. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // mintrans.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (дата обращения: 01.11.2024).

9. Транспорт Монголии: недавние успехи в строительстве железных дорог// journal-neo.su : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznyh-dorog/> (дата обращения: 08.11.2024).

10. Архит, Б. Проблемы инфраструктурного комплекса железных дорог Монголии / Б. Архит, В. А. Оленцевич. – Текст : непосредственный // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024) : сборник трудов международной научно-практической конференции / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 12–14. – EDN JPGVVM.

11. Разработка графического редактора для специализированной информационно-вычислительной системы планирования маневровой работы на промышленном транспорте / Т. А. Нечай, В. Р. Роганов, О. А. Кувшинова [и др.]. – Текст : непосредственный // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т. 8. – № 4 (48). – С. 97–104. – EDN PMMVJW.

12. Nechai, T., Korop, G., Roganov, V., Roganova, E., & Chirkina, M. (2019, February). Information and computing system for planning of management of railway stations of industrial enterprises. In *International Conference Communicative Strategies of Information Society (CSIS 2018)* (pp. 246-251). Atlantis Press.

13. Leimane, L., & Nikiforova, O. (2018). Mapping of activities for object-oriented system analysis. *Applied Computer Systems*, 23(1), 5-11.

14. Асташков, Н. П. Изменение технологии работы транспортно-технологической системы железнодорожного транспорта за счет использования нового типа подвижного состава / Н. П. Асташков, А. А. Оленцевич. – Текст : непосредственный // Наука сегодня: задачи и пути их решения : материалы международной научно-практической конференции / Научный центр «Диспут». – Вологда, 2019. – С. 16–17. – EDN ZUXUDS.

15. Оленцевич, В. А. Анализ причин нарушения безопасности работы железнодорожной транспортной системы / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 1 (37). – С. 180–183. – EDN PXJUZH.

16. ГК 1520 и «Монгольские железные дороги» будут развивать железнодорожную инфраструктуру Монголии // comnews.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zhe-leznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnyu-infrastrukturu-mongolii> (дата обращения: 08.11.2024).

17. Краткосрочное прогнозирование эксплуатационного грузооборота Восточно-Сибирской железной дороги / С. И. Носков, Д. А. Быков, А. Ю. Улыбина, Т. Т. Улыбин. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 2 (104). – С. 50–54. – EDN QVEQCW.

18. Носков, С. И. Анализ срабатываний регрессоров в кусочно-линейной модели эксплуатационного грузооборота железнодорожного транспорта / С. И. Носков, Т. Т. Улыбин, А. Ю. Улыбина. – Текст : непосредственный // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 81–84. – EDN JHSPWQ.

19. Сценарии развития Восточной Сибири и российского Дальнего Востока в контексте политической и экономической динамики Азиатско-Тихоокеанского региона до 2030 года : аналитический доклад / Л. А. Аносова, А. Г. Коржубаев, А. Н. Панов [и др.]. – Москва : Едиториал УРСС, 2011. – 120 с. – Текст : непосредственный.

20. Оленцевич, В. А. Аспекты реализации проекта экономического коридора «Россия –

Монголия – Китай» / В. А. Оленцевич, Б. Архит, Н. А. Новикова. – Текст : непосредственный // Финансовые аспекты структурных преобразований экономики. – 2024. – № 10. – С. 72–82. – EDN RFJWVM.

21. Ермоленко, И. Ю. Влияние продольных нагрузок на безопасность движения при эксплуатации на горно-перевальных участках пути / И. Ю. Ермоленко, Д. В. Морозов, Н. П. Асташков. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (82). – С. 104–111. – EDN SYATJZ.

22. Агрегированный критерий оценки эффективности функционирования участков Улан-Баторской железной дороги / С. И. Носков, М. П. Базилевский, Ю. А. Трофимов, А. Буяннэмэх. – Текст : непосредственный // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 5 (39). – С. 159–164. – DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.013. – EDN SCWWFZ.

23. Рахмангулов, А. Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурков. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов SWorld. – 2012. – Т. 2. – № 4. – С. 7–13. – EDN PKVZBR.

24. Тимухина, Е. Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Тимухина Елена Николаевна ; Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2012. – 44 с. – Текст : непосредственный.

25. Разработка графической модели подъездного пути для оперативного моделирования маневровой работы на промышленном транспорте / Г. И. Нечаев, А. А. Клюев, Ю. А. Шкандибин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 4 (193). – Ч. 2. – С. 124–127.

### References

1. *Rasporiazhenie Pravitel'stva RF ot 30.09.2018 № 2101-r «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshirenii magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation dated 30.09.2018 No 2101-r : On approval of the Comprehensive Plan for the Modernization and Expansion of the Main infrastructure for the period up to 2024]. Available at: <http://government.ru/docs/34297/> (accessed 01.11.2024).

2. *Rossiiskie zheleznye dorogi* [Russian Railways]. Available at: <http://www.rzd.ru> (accessed 01.11.2024).

3. Dinets D.A., Konotopov M.V. [International transport corridors: prospects for Russia]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona : materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii : v 2 tomakh* [Transport infrastructure of the Siberian region : materials of the IX International Scientific and Practical Conference : in 2 volumes]. Irkutsk, 2018, vol. 2, pp. 48-53. EDN UTYXCM. (In Russian).

4. Umanskii V.I. *Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami zheleznodorozhnogo transporta na baze integratsii metodov vysokotochnogo sputnikovogo pozitsionirovaniya i inertsiyal'noi navigatsii* [Automation of control of technological processes of railway transport based on the integration of methods of high-precision satellite positioning and inertial navigation]. Doctor's theses, Moscow, MIIT, 2012, 46 p. (In Russian).

5. Gershal'd A.S. *Operativnoe upravlenie protsessom gruzovykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte v usloviyakh rynochnoi ekonomiki* [Operational management of freight transportation by rail in a market economy]. Doctor's theses, Moscow, VNIIS, 2004, 517 p. (In Russian).

6. *Pravitel'stvo Mongolii predstavilo programm deistvii na chetyre goda* [The Government of Mongolia has presented an action program for four years]. Available at: <https://burunen.ru/news/society/131542-pravitelstvo-mongolii-predstavilo-programmu-deystviy-na-chetyre-goda/> (accessed 08.11.2024).

7. *Politika dolgosrochnogo razvitiya Mongolii: «Videnie – 2050»* [Mongolia's Long-term Development Policy: «Vision – 2050»]. Available at: <http://www.mongolnow.com/politika-dolgosrochnogo-razvitiya-mongolii-videnie-2050/> (accessed 01.11.2024).

8. *Rasporiazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation. Federation No. 3363-r dated 27.11.2021 : On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (accessed 01.11.2024).

9. *Transport Mongolii: nedavnie uspekhi v stroitel'stve zheleznykh dorog* [Transport of Mongolia: recent successes in the construction of railways]. Available at: <https://journal-neo.su/ru/2023/10/21/transport-mongolii-nedavnie-uspehi-v-stroitelstve-zheleznykh-dorog/> (accessed 08.11.2024).

10. Arkit B., Olentsevich V.A. [Problems of the infrastructure complex railways of Mongolia]. *Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na transporte (UERT-2024): elektronnyi sbornik trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Management of operational work in transport (UERT-2024): electronic proceedings of the II International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 2024, pp. 12-14. EDN JPGVVM. (In Russian).

11. Nechai T.A., Roganov V.R., Kuvshinova O.A., Korop G.V. Development of graphic editor for specialized information and computing system for planning of maneuvering work in industrial transport. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoiashchego plyus – XXI century: results of the past and problems of the present plus*, 2019, vol. 8, no. 4 (48), pp. 97-104. EDN PMMVJW. (In Russian).

12. Nechai, T., Korop, G., Roganov, V., Roganova, E., & Chirkina, M. (2019, February). Information and computing system for planning of management of railway stations of industrial enterprises. In *International Conference Communicative Strategies of Information Society (CSIS 2018)* (pp. 246-251). Atlantis Press.

13. Leimane, L., & Nikiforova, O. (2018). Mapping of activities for object-oriented system analysis. *Applied Computer Systems*, 23(1), 5-11.

14. Astashkov N.P., Olentsevich A.A. [Changing the technology of the transport and technological system of railway transport through the use of a new type of rolling stock]. *Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science today: tasks and ways to solve them: materials of the international scientific and practical conference]. Vologda, 2019, pp. 16-17. EDN ZUXUDS. (In Russian).

15. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Analysis of the violation of the railway transport system safety causes. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013, no. 1 (37). pp. 180-183. EDN PXJUZH. (In Russian).

16. *GK 1520 i «Mongol'skie Zheleznye Dorogi» budut razvivat' zheleznodorozhnyuyu infrastrukturu Mongolii* [Group of companies 1520 and Mongolian Railways will develop Mongolia's railway infrastructure]. Available at: <https://www.comnews.ru/content/230028/2023-11-08/2023-w45/1011/gk-1520-i-mongolskie-zheleznye-dorogi-budut-razvivat-zheleznodorozhnyuyu-infrastrukturu-mongolii> (accessed 08.11.2024).

17. Noskov S.I., Bykov D.A., Ulybina A.Yu., Ulybin T.T. Short-term forecasting of the operational cargo turnover of the East Siberian Railway. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2024, no. 2 (104), pp. 50-54. EDN QVEQCW. (In Russian).

18. Noskov S.I., Ulybin T.T., Ulybina A.Yu. Analysis of the triggering of regressors in a piecewise linear model of the operational freight turnover of railway transport. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, 2023, vol. 26, no. 8, pp. 81-84. EDN JHSPWQ. (In Russian).

19. Anosova L.A., Korzhubaev A.G., Panov A.N. et al. *Stsenarii razvitiia Vostochnoi Sibiri i rossiiskogo Dal'nego Vostoka v kontekste politicheskoi i ekonomicheskoi dinamiki Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona do 2030 goda: analiticheskii doklad* [Scenarios for the development of Eastern Siberia and the Russian Far East in the context of the political and economic dynamics of the Asia-Pacific region until 2030: an analytical report]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2011, 120 p. (In Russian).

20. Olentsevich V.A., Arkit B., Novikova N.A. Aspects of the implementation of the economic project the Russia-Mongolia-China corridor. *Finansovye aspekty strukturnykh preobrazovaniy ekonomiki – Financial aspects of structural transformations of the economy*, 2024, no. 10, pp. 72-82. EDN RFJWVM. (In Russian).

21. Ermolenko I.Yu., Morozov D.V., Astashkov N.P. Influence of longitudinal loads on traffic safety when operating on mountain passway sections. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2021, no. 2 (82), pp. 104-111. EDN SYATJZ. (In Russian).

22. Noskov S.I., Bazilevskii M.P., Trofimov Yu.A., Buyannemekh A. Aggregated criterion for estimating the efficiency of functioning of sections of the Ulan-Bator railway. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik – South-Siberian Scientific Bulletin*, 2021, no. 5 (39), pp. 159-164. DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.013. EDN SCWWFZ. (In Russian).

23. Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. Features of building a simulation model of railway station operation technology in the AnyLogic system. *Sbornik nauchnykh trudov SWORLD – Proceedings SWORLD*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 7-13. EDN PKVZBR. (In Russian).

24. Timukhina E.N. *Povyshenie funktsional'noi nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsii pri tekhnologicheskikh sboiakh* [Improving the functional reliability of railway stations in case of technological failures]. Doctor's theses, Ekaterinburg, USTU, 2012, 44 p. (In Russian).

25. Nechaev G.I., Klyuev A.A., Shkandibin Yu.A., Nechai T.A. Development of a graphical model of an access road for operational modeling of shunting work in industrial transport. *Visnik skhidnoukraïns'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya – Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dal'*, 2013, no. 4 (193), part 2, pp. 124-127. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Буяннэмэх Архит

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 01-66.

E-mail: buyan\_s@yahoo.com

### Оленцевич Виктория Александровна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 01-66.

E-mail: olencevich\_va@mail.ru

### Каимов Евгений Витальевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 02-10.

E-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Буяннэмэх, А. Вопросы применения интеллектуальной системы управления и организации маневровой работы на инфраструктурном комплексе Улан-Баторской железной дороги / А. Буяннэмэх, В. А. Оленцевич, Е. В. Каимов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 63 – 78.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Buyannemekh Arkhit

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskii st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Operation Work Management», ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99, add 01-66.

E-mail: buyan\_s@yahoo.com

### Olentsevich Victoriya Alexandrovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskii st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Operation Work Management», ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99, add 01-66.

E-mail: olencevich\_va@mail.ru

### Kaimov Evgenii Vital'evich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskii st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Building of railways, bridges and tunnels», ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99, add 02-10.

E-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Buyannemekh A., Olentsevich V.A., Kaimov E.V. Issues of application of an intelligent management system and the organization of shunting work on the infrastructure the Ulaanbaatar railway complex. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 63-78. (In Russian).

## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ УЗЛАМИ С НЕРАВНОМЕРНЫМИ ПОТОКАМИ

**Аннотация.** Эффективное управление железнодорожными узлами является ключевым фактором в обеспечении надежности и безопасности транспортной инфраструктуры. В условиях глобализации и растущих объемов перевозок необходимо внедрение современных технологий и инновационных решений. Цель работы: Железнодорожные узлы представляют собой сложные транспортные системы, характеризующиеся высокой степенью связности и взаимодействия различных элементов. Управление узлами с неравномерными потоками требует разработки и использования интегрального подхода, который позволит учитывать множество факторов. Настоящая работа рассматривает современные подходы к управлению железнодорожными узлами, регулирование потока, поддержание рабочего парка вагонов, обеспечение качества обслуживания и внедрение современных систем контроля и автоматизации. Метод: Для расчета времени нахождения потока в узле необходимо учитывать все потоки и их изменения во времени. В более сложных системах, где потоки изменяются, требуется интегральный подход и учет временных изменений для точного определения времени нахождения. Интегральный подход к управлению железнодорожными узлами с неравномерными потоками решается с объединяющими экономико-математическими моделями, системами массового обслуживания и современными цифровыми технологиями, что открывает новые перспективы для совершенствования транспортных систем в условиях растущих объемов перевозок и усиления их неравномерности. Область применения результатов: В итоге, эффективное управление железнодорожными узлами требует комплексного подхода, направленного на улучшение всех аспектов функционирования, что в свою очередь будет способствовать устойчивому развитию транспортной системы. Применение нового подхода к моделированию железнодорожных узлов с неравномерными потоками позволит более точно учитывать реальную динамику потоков, включая их колебания и случайные факторы. Интеграция современных данных и цифровых технологий обеспечивает более высокую степень достоверности моделирования.

**Ключевые слова:** железнодорожные узлы, эффективное управление, мониторинг, накопление вагонов, пропускная способность.

**Samandar B. Sattorov, Shukhrat U. Saidivaliev**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

## AN INTEGRATED APPROACH TO MANAGING RAILWAY JUNCTS WITH UNEVEN TRAFFIC FLOWS

**Abstract.** Efficient management of railway junctions is a key factor in ensuring the reliability and safety of transport infrastructure. In the context of globalization and growing traffic volumes, it is necessary to implement modern technologies and innovative solutions. Objective: Railway junctions are complex transport systems characterized by a high degree of connectivity and interaction of various elements. Management of junctions with uneven flows requires the development and use of an integrated approach that takes into account many factors. This paper considers modern approaches to the management of railway junctions, flow regulation, maintenance of the working fleet of cars, ensuring service quality and the implementation of modern control and automation systems. Method: To calculate the time the flow spends at a junction, it is necessary to take into account all flows and their changes over time. In more complex systems, where flows change, an integrated approach and consideration of time changes are required to accurately determine the time spent at a junction. An integrated approach to managing railway junctions with uneven flows is solved with unifying economic and mathematical models, mass service systems and modern digital technologies, which opens up new prospects for improving transport systems in the context of growing traffic volumes and increasing unevenness. Scope of application of the results: As a result, effective management of railway junctions requires an integrated approach aimed at improving all aspects of operation, which in turn will contribute to the sustainable development of the transport system. The effect of applying the new approach to modeling railway junctions with uneven flows allows for a more accurate consideration of the real dynamics of flows, including their fluctuations and random factors. The integration of modern data and digital technologies provides a higher degree of reliability of modeling.

**Keywords:** railway junctions, effective management, monitoring, accumulation of wagons, capacity.

Железнодорожная сеть Узбекистана является важной частью национальной и международной транспортной системы, связывающей страну с Центральной Азией, Россией, Китаем и Европой. За последние годы Узбекистан активно инвестировал в модернизацию железнодорожной инфраструктуры для повышения пропускной способности и улучшения качества услуг [5 – 8].

Основные железнодорожные узлы: Ташкент – крупнейший транспортный узел страны, соединяющий магистрали в направлениях России, Казахстана, Афганистана и Китая; Навои – важный узел, где находятся международный логистический центр и аэропорт, что способствует развитию мультимодальных перевозок; Карши и Термез – стратегически важные узлы, обеспечивающие транспортировку грузов в Афганистан и страны Южной Азии (рисунок 1).

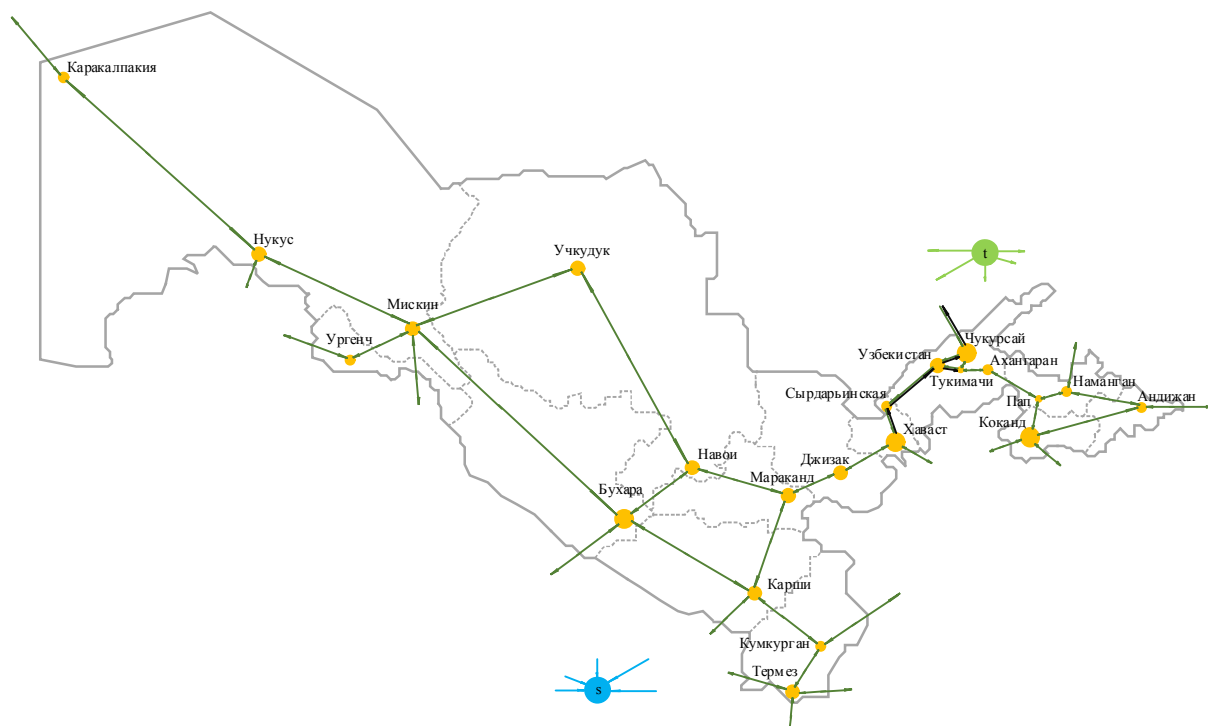


Рисунок 1 – Железнодорожная сеть Республики Узбекистан

Узбекистан участвует в проектах «Один пояс, один путь» и Транскаспийского международного транспортного маршрута, что открывает новые возможности для интеграции с Китаем, Европой и другими странами.

Несмотря на позитивные изменения есть несколько ключевых проблем, которые ограничивают пропускную способность железнодорожных узлов:

ограниченная пропускная способность на некоторых участках. Из-за старения инфраструктуры и нехватки современных технологий на узких участках возникают заторы, особенно в пиковые периоды;

недостаток оборудования для перегрузки. Некоторые терминалы не оснащены достаточным количеством кранов и другой техники для эффективной перегрузки вагонов, что замедляет процесс;

отсутствие координации между видами транспорта. В некоторых случаях наблюдаются проблемы с взаимодействием железнодорожного транспорта и других видов перевозок (например, автомобильных), что замедляет доставку грузов;

износ подвижного состава. Несмотря на обновление локомотивов и вагонов многие старые единицы все еще остаются в эксплуатации, что снижает эффективность перевозок.

Железнодорожные узлы представляют собой сложные транспортные системы, характеризующиеся высокой степенью связности и взаимодействия различных элементов.

Управление узлами с неравномерными потоками требует разработки и использования интегрального подхода, который позволяет учитывать множество факторов: динамику грузопотоков, взаимодействие с другими видами транспорта, сезонные колебания и другие параметры, влияющие на функционирование узла. В последние десятилетия были проведены значительные исследования, направленные на оптимизацию работы железнодорожных узлов с учетом неравномерных потоков, в том числе разработки научных школ и отдельных ученых.

Одним из первых, кто предложил использовать математические методы в транспортной науке, был Л. В. Канторович, создавший основы линейного программирования. Его работы оказали значительное влияние на развитие методов оптимизации в управлении транспортными системами, включая железнодорожные узлы. В частности, его подходы к распределению ресурсов и минимизации затрат на транспортировку применялись для решения задач оптимизации потоков на станциях и узлах [1].

Исследования в области теории массового обслуживания, начатые Е. С. Вентцелем и Н. Н. Моисеевым, нашли свое применение в управлении потоками на железнодорожных узлах. Теория позволила моделировать процессы поступления и обработки поездов, учитывать случайные колебания интенсивности движения и распределение времени обработки поездов. Внедрение этих моделей в практику позволило учесть вероятностные аспекты, что особенно важно для узлов с неравномерными потоками [2, 3].

Научные школы, развивавшие подходы к управлению подвижным составом, активно исследовали возможности интеграции автоматизированных систем управления. Работы Н. П. Бусленко и его последователей фокусировались на разработке и внедрении систем управления, способных динамически регулировать потоки на станциях и узлах. Эти исследования внесли значительный вклад в понимание, как автоматизированные системы могут улучшить пропускную способность и сократить время простоев в условиях неравномерных потоков [4].

С развитием мультимодальных перевозок и усилением роли железнодорожных узлов как ключевых элементов транспортных коридоров исследования в области логистики стали неотъемлемой частью теоретической базы. Научные школы, занимавшиеся интеграцией железнодорожных и других видов транспорта, разрабатывали методы управления узлами с неравномерными потоками, где основное внимание уделялось координации между различными видами транспорта. Такие исследования помогли создать основу для эффективного распределения грузопотоков в условиях сезонных и суточных колебаний интенсивности перевозок.

Современные исследования все чаще фокусируются на интеграции цифровых технологий и «умных» систем управления на железнодорожных узлах. Важной частью таких разработок являются системы мониторинга и анализа данных, которые позволяют динамически регулировать процессы, снижая влияние неравномерности и повышая устойчивость системы [9 – 13].

Интегральный подход к управлению железнодорожными узлами с неравномерными потоками представляет собой важное направление исследований, объединяющее экономико-математические модели, системы массового обслуживания и современные цифровые технологии. Вклад различных научных школ и ученых, начиная с середины XX в. и до настоящего времени, позволил создать богатую теоретическую базу для анализа и оптимизации работы узлов. Однако внедрение этих решений в реальную практику требует дальнейших исследований и адаптации, что открывает новые перспективы для совершенствования транспортных систем в условиях растущих объемов перевозок и усиления их неравномерности.

Накопление вагонов в железнодорожном узле и его последствия – это важные аспекты, которые нужно учитывать при управлении железнодорожными транспортными системами. Накопление вагонов в узле может привести к различным последствиям в зависимости от типа вагонов, вида и специфики использования узла.

Возможные последствия накопления вагонов в узле: переполнение узла (когда поступающие в узел вагоны превышают его объем); избыточность (когда узел тупиковый и у него нет обходных путей для вывода лишних вагонов); стабильность и структурная целостность (когда сверхнакопление вагонов может привести к износу или повреждению); ухудшение качества обслуживания (когда вагоны в узле находятся длительное время, ухудшение доставки груза).

Для эффективного управления узлом и предотвращения накопления вагонов необходимо сочетание инженерных решений и управления процессами. Регулирование потока, поддержание рабочего парка вагонов, обеспечение качества обслуживания и внедрение современных систем контроля и автоматизации – все это ключевые меры для предотвращения негативных последствий и обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации узлов.

Для расчета времени нахождения вагонов в узле (время удерживания или время пребывания) необходимо знать объем узла и пропускную способность узла, вход в узел или выход с него. Время нахождения вагонов в узле показывает, сколько времени требуется потоку, чтобы пройти через узел от входа до выхода.

Время нахождения вагонов в узле  $T$  можно рассчитать по формуле:

$$T = \frac{R}{N}, \quad (1)$$

где  $T$  – время нахождения вагонов в узле, час;  $R$  – объем узла, вагон;  $N$  – пропускная способность узла, вагон/ч.

Необходимо определить объем узла. Объем узла  $R$  может быть определен суммированием рабочего парка вагонов станций, расположенных в узле.

Рабочий парк вагонов железнодорожного узла включает в себя все вагоны, которые используются на узле для грузовых и пассажирских перевозок. Этот парк состоит из различных типов вагонов: пассажирские вагоны, грузовые платформы, цистерны, полувагоны и специализированные вагоны (для перевозки автотранспорта, угля, леса и т. д.).

Объем парка вагонов зависит от нескольких ключевых факторов.

1. Тип железнодорожного узла: в основном обслуживают как пассажирские, так и грузовые вагоны, что увеличивает общую нагрузку на парк и инфраструктуру.

2. Поток: узлы с высокими потоками требуют наличия большого количества вагонов для обеспечения своевременной погрузки и выгрузки грузов, а также для регулярного обслуживания пассажиров.

3. Интенсивность и сезонность перевозок: в зависимости от времени года и специфики грузов или пассажиропотоков объем парка может варьироваться (увеличение числа пассажирских вагонов летом или зимой, увеличение количества зерновозов во время сельскохозяйственного сезона).

4. Техническое состояние вагонов: постоянное наличие в парке достаточного количества исправных вагонов зависит от уровня их технического обслуживания и скорости замены старых вагонов на новые.

Сложности, связанные с рабочим парком вагонов: недостаток вагонов; износ подвижного состава; нерегулярность в поступлении и отправлении составов; сложности с маневровыми операциями; сложности технического обслуживания; сложности с учетом и управлением парком; специфика грузов.

Необходимо рассчитать пропускную способность узла  $N$ . Пропускная способность железнодорожного узла – это максимальное количество поездов, которые могут пройти через узел за определенное время (в сутки), с учетом заданного уровня безопасности и качества перевозок.

Факторы, снижающие пропускную способность железнодорожного узла:

1. Низкое качество инфраструктуры: ограниченное количество путей (недостаточная длина или количество станционных путей); устаревшие стрелочные переводы и сигнальные устройства; недостаток погрузочно-разгрузочных мощностей.

2. Неэффективное управление движением: несогласованность графиков движения поездов; плохая координация работы диспетчеров и смежных железнодорожных станций; неэффективные системы автоматизации и диспетчеризации.

3. Внешние факторы: неблагоприятные погодные условия; аварии и неисправности в работе подвижного состава или инфраструктуры; увеличение объема грузо- и пассажиропотока без адекватного роста инфраструктуры.

4. Технические ограничения: ограниченная пропускная способность отдельных перегонов, связывающих узел с другими направлениями; низкая скорость движения поездов из-за кривых, подъемов или плохого состояния пути; ограниченная вместимость станционных площадей для маневровых операций и отстоя вагонов.

Для расчета входящего и выходящего потоков в узле с множеством входов и выходов необходимо учитывать все потоки, поступающие в резервуар и покидающие его. В данном контексте под потоком подразумевается объем жидкости или газа, проходящий через определенную точку за единицу времени.

Основные этапы расчета входящего и выходящего потоков:

- 1) идентификация всех входов и выходов;
- 2) измерение или расчет скорости потока;
- 3) определение пропускной способности входа и выходного участка;
- 4) определение общего баланса потока.

Общий баланс потока в резервуаре можно определить, вычитая суммарный выходящий поток из суммарного входящего потока:

$$\Delta N = N_{\text{вх}} - N_{\text{вых}}. \quad (2)$$

Если  $\Delta Q > 0$ , это означает, что в узел поступает поток, больший, чем выходит из него (наполнение узла).

Если  $\Delta Q < 0$ , это означает, что из узла выходит поток, больший, чем поступает в него (опорожнение узла).

Если  $\Delta Q = 0$ , то входящий и выходящий потоки сбалансированы.

Правильный расчет входящих и выходящих потоков необходим для управления узлами и предотвращения аварийных ситуаций. Использование точных расчетов и учета всех факторов, влияющих на потоки, обеспечит надежную работу системы.

Если в системе имеются переменные входные и выходные потоки, для расчета времени нахождения может потребоваться более сложный подход, включающий в себя учет переменных потоков и использование программного обеспечения для моделирования.

Расчет времени нахождения потока в узле с множеством входов и выходов является сложной задачей, поскольку требуется учитывать все потоки, их скорость, объемы и изменения подхода потока к узлу. В таких системах расчет может быть выполнен с использованием уравнений непрерывности и математического моделирования.

Основные этапы расчета времени нахождения потока с множеством входов и выходов:

1. Определение объемов и расходов для каждого входа и выхода: определить пропускную способность  $N_i$  для каждого входа  $i$  и  $N_j$  для каждого выхода  $j$  и установить, какие потоки являются входными и какие – выходными.

2. Установление общего баланса масс (уравнение непрерывности).

Уравнение непрерывности означает, что сумма всех входных потоков должна равняться сумме всех выходных потоков плюс изменение объема потока в узле за единицу времени:

$$(N_i - N_j) = \frac{dR}{dt}, \quad (3)$$

где  $N_i$  – суммарная пропускная способность входящих потоков;

$N_j$  – суммарная пропускная способность выходящих потоков;

$\frac{dR}{dt}$  – изменение объема потока в узле за единицу времени.

3. Определение среднего времени нахождения потока (время удерживания).

Среднее время нахождения потока, или время удерживания  $T$ , определяется как отношение объема узла  $R$  к суммарной пропускной способности выходных потоков:

$$T = \frac{R}{N_j}. \quad (4)$$

4. Расчет объема узла.

Определить текущий объем  $R(t)$  потока в узле, который может изменяться со временем в зависимости от входящих и выходящих потоков.

Чтобы рассчитать среднее время нахождения в системе с множеством входов и выходов, нужно выполнить следующие шаги:

1. Определить начальные условия: установить начальный объем потока  $R_0$  в узле и определить начальные значения для всех входящих и выходящих потоков.

2. Вычислить объемы и расходы: рассчитать текущий объем  $R(t)$  в узле на любой момент времени  $t$  с учетом входящих и выходящих потоков:

$$R(t) = R_0 + \int_0^t (N_i - N_j) dt, \quad (5)$$

где  $\int_0^t (N_i - N_j) dt$  – интеграл, определяющий изменение объема за время от 0 до  $t$ .

3. Вычислить среднее время нахождения: для каждой пары входного и выходного потоков рассчитать среднее время нахождения с учетом потока:

$$T_i = \frac{R(t)}{N_j}. \quad (6)$$

Для системы с множеством входов и выходов среднее время нахождения можно также оценить как средневзвешенное время удерживания, учитывающее все потоки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{R(t)}{N_j}. \quad (7)$$

Применение нового подхода к моделированию железнодорожных узлов с неравномерными потоками позволит более точно учитывать реальную динамику потоков, включая их колебания и случайные факторы. Интеграция современных данных и цифровых технологий обеспечивает более высокую степень достоверности моделирования. В отличие от традиционных методов представленный метод позволяет обрабатывать большие объемы данных в реальном времени, что существенно сокращает время на анализ и оптимизацию работы узлов. Это особенно важно при управлении сложными потоками на крупных узлах, где временной фактор имеет решающее значение. Позволяет быстро адаптироваться к изменениям в транспортных потоках, таким как неожиданные колебания объемов грузов или изменения в расписании. Это обеспечивает большую гибкость управления и снижает негативные последствия от неравномерности потоков.

Время нахождения потока в узле является важным параметром в проектировании и управлении железнодорожными системами, а также в технической и технологической обработке. Оно помогает определить, сколько времени требуется потоку завершения процессов внутри узла, и влияет на эффективность операций, качество обслуживания и безопасность системы.

Для расчета времени нахождения потока в узле с множеством входов и выходов необходимо учитывать все потоки и их изменения во времени. В простых случаях, когда объем и расход постоянны, расчет времени нахождения может быть выполнен напрямую. В более сложных системах, где потоки изменяются, требуются интегральный подход и учет временных изменений для точного определения времени нахождения.

Список литературы

1. Канторович, Л. В. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков / Л. В. Канторович, М. К. Гавурин. – Текст : непосредственный // Проблемы повышения эффективности работы транспорта. – 1949. – С. 110–138.
2. Вентцель, Е. С. Введение в исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва : Советское радио, 1964. – 432 с. – Текст : непосредственный.
3. Моисеев, Н. Н. Имитационные модели / Н. Н. Моисеев. – Москва : Политиздат, 1977. – 84 с. – Текст : непосредственный.
4. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – Москва : Наука, 1978. – 400 с. – Текст : непосредственный.
5. Саидивалиев, Ш. У. История поэтапного развития железнодорожной сети и создания сортировочных станций в Республики Узбекистан / Ш. У. Саидивалиев, С. Б. Сатторов. – Текст : непосредственный // *Universum: технические науки*. – 2024. – № 3-3 (120). – С. 18–22. – DOI 10.32743/UniTech.2024.120.3.16994. – EDN QIDMXN.
6. Sattorov, S., Kotenko, A., Saidivaliev, S., Barotov, J., & Rustamov, N. (2023). Development of the fundamentals for organizing the transportation of local goods on the railways of the republic of Uzbekistan. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 460, p. 06015). EDP Sciences.
7. Сатторов, С. Б. Критерии определения опорных станций для работы с поездами, перевозящими местные грузы на территории Республики Узбекистан / С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко. – Текст : непосредственный // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года / Российский университет транспорта. – Москва, 2021. – С. 238–244. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.34. – EDN TASPLK.
8. Котенко, А. Г. Организация перевозок местных грузов на железных дорогах Республики Узбекистан в условиях увеличения транзитного грузопотока / А. Г. Котенко, С. Б. Сатторов. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы-2021 : материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 9 – 10 ноября 2021 г. Т. 1 / Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 127–132. – EDN ACGPHG.
9. Об актуальных направлениях развития железнодорожной логистики на полигоне Центрального транспортного узла / М. В. Роменская, А. Д. Ершов, М. Ю. Соколов, А. Р. Арустамова. – Текст : непосредственный // *Инновационный транспорт*. – 2023. – № 1 (47). – С. 14–20. – DOI 10.20291/2311-164X-2023-1-14-20. – EDN WWFHGP.
10. Дмитриев, Е. О. Методы обоснования вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети / Е. О. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 26–38. – EDN CBNRNJ.
11. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, В. В. Алабина, М. В. Бакалов. – Текст : непосредственный // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2021. – № 1 (81). – С. 104–114. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_104. – EDN AVMMET.
12. Горожанкин, Н. А. Развитие инфраструктуры железнодорожных узлов Дальнего Востока для мультимодальных перевозок грузов / Н. А. Горожанкин, Н. И. Костенко. – Текст : непосредственный // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. – 2019. – Т. 1. – С. 128–132. – EDN ECKWCB.
13. Козлов, П. А. Проблема организации единой транспортной системы / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. С. Колокольников. – Текст : непосредственный // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2018. – Т. 14. – № 3. – С. 748–755. – DOI 10.25559/SITITO.14.201803.748-755. – EDN YYHQVF.

References

1. Kantorovich L.V., Gavurin M.K. Application of mathematical methods in the analysis of cargo flows. *Problemy povysheniia effektivnosti raboty transporta – Problems of increasing the transport work efficiency*, 1949, pp. 110-138. (In Russian).
2. Venttsel' E.S. *Vvedenie v issledovanie operatsii* [Introduction to the study of operations]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1964, 432 p. (In Russian).
3. Moiseev N.N. *Imitatsionnye modeli* [Simulation models]. Moscow : Politizdat Publ., 1977, 84 p. (In Russian).
4. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 400 p. (In Russian).
5. Saidivaliev Sh.U., Sattorov S.B. The history of the phased development of the railway network and the creation of marshalling yards in the Republic of Uzbekistan. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: technical sciences*, 2024, no. 3-3 (120), pp. 18-22. DOI 10.32743/UniTech.2024.120.3.16994. EDN QIDMXN. (In Russian).
6. Sattorov, S., Kotenko, A., Saidivaliev, S., Barotov, J., & Rustamov, N. (2023). Development of the fundamentals for organizing the transportation of local goods on the railways of the republic of Uzbekistan. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 460, p. 06015). EDP Sciences.
7. Sattorov S.B., Kotenko A.G. [Criteria for determining reference stations for working with trains carrying local goods on the territory of the Republic of Uzbekistan]. *Akademik Vladimir Nikolaevich Obraztsov – osnovopolozhnik transportnoi nauki : trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 125-letiiu universiteta, Moskva, 22 oktiabria 2021 goda* [Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov – the founder of transport science : proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the University, Moscow, October 22, 2021]. Moscow, 2021, pp. 238-244. DOI 10.47581/2022/Obrazcov.34. EDN TASPLK. (In Russian).
8. Kotenko A.G., Sattorov S.B. Organization of local cargo transportation on the railways of the Republic of Uzbekistan in the conditions of increasing transit freight flow. *Transport Rossii: problemy i perspektivy-2021 : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 9 – 10 noiabria 2021 g. T. 1* [Transport of Russia: problems and prospects-2021 : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09-10, 2021. Volume 1]. St. Petersburg, 2021, pp. 127-132. EDN ACGPHG. (In Russian).
9. Romenskaya M.V., Ershov A.D., Sokolov M.Yu., Arustamova A.R. About the current directions of railway logistics development at the testing ground of the Central transport hub. *Innovatsionnyi transport – «Innotrans» Journal*, 2023, no. 1 (47), pp. 14-20. DOI 10.20291/2311-164X-2023-1-14-20. EDN WWFHGP. (In Russian).
10. Dmitriev E.O. Substantiation methods of alternative technological modes of railway network polygons operation. *Biulleten' uchenogo soveta AO "IERT" – Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"*, 2021, no. 6, pp. 26-38. EDN CBNRNJ. (In Russian).
11. Chislov O.N., Trapeznov V.V., Alabina V.V., Bakalov M.V. Formation methods and principles of intellectualization in the management of the terminal-warehouse system of the transport unit. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2021, no. 1 (81), pp. 104-114. DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_104. EDN AVMMET. (In Russian).
12. Gorogankin N.A., Kostenko N.I. Development of infrastructure of railway nodes of the Far East for multimodal transport of cargo. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke – Scientifically technical and economical cooperation in Asia-Pacific countries in the 21st century*, 2019, vol. 1, pp. 128-132. EDN ECKWCB. (In Russian).
13. Kozlov P.A., Tushin N.A., Kolokolnikov V.S. Problem of common transport system organization. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie – Modern Information Technologies and IT-Education*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 748-755. DOI 10.25559/SITITO.14.201803.748-755. EDN YYHQVF. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Сатторов Самандар Бахтиерович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

### Саидивалиев Шухрат Умарходжаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сатторов, С. Б. Интегральный подход к управлению железнодорожными узлами с неравномерными потоками / С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидивалиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 79 – 87.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Sattorov Samandar Baxtiyorovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchilar st., 1, Tashkent City, 100060, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

### Saidivaliev Shukhrat Umarhodjaevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchilar st., 1, Tashkent City, 100060, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sattorov S.B., Saidivaliev Sh.U. An integrated approach to managing railway juncts with uneven traffic flows. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 79-87. (In Russian).

УДК 656.073

**С. Б. Джахьяева, Е. В. Климова**

Астраханский государственный технический университет (АГТУ), г. Астрахань, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБ ДЛЯ НЕФТЕПРОВОДА

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы реализации логистических задач при транспортировке магистральных труб для нефтепроводов. Приведена логистическая цепочка транспортировки магистральных труб, описаны элементы системы, характеризующиеся повышенной сложностью при реализации на практике. Наиболее проблемным звеном логистической цепи является перевалка магистральных труб с водного транспорта на автомобильный. С целью обеспечения высокой результативности работы транспортно-логистической системы разработано решение, реализуемое спаренной работой порталных кранов. Для оценки эффективности предлагаемого решения была разработана расчетно-динамическая модель. Примером послужила операция перевалки, осуществляемая в порту на территории Астраханской области. Рассматриваемый грузовой порт связан автомобильной дорогой с дорогами общего пользования, по которым в настоящее время осуществляется доставка тяжеловесных грузов, а также единой глубоководной системой европейской части России со странами ближнего и дальнего зарубежья. Задействованные перевозочные средства: сухогрузная баржа и специализированный автопоезд. При перевалке предусмотрено использование двух кранов. Применен метод конечных элементов. Проведен статистический расчет. Определена динамическая реакция при ветровом воздействии. Разработанная модель учитывает стадийность подъема, переменность жесткости каната, режимы двигателей, перекос груза, влияние стилей управления крановщиков на нагруженность. На фоне активного развития нефтяной отрасли в нашей стране вопрос организации перевозки объектов нефтепровода является актуальным. Предлагаемая схема позволит сократить временные и материальные затраты при перевалке грузов, повысив эффективность всей логистической цепи. По итогам расчетов выявлено, что статическая и динамическая реакции порталных кранов КПП 16 (20/32) не превышают предельных состояний. Расчетно-динамическая модель позволяет доказать целесообразность применения формата спаренной работы кранов при перевалке магистральных труб в рамках функционирования транспортно-логистической системы, нацеленной на строительство и обслуживание нефтепроводов.

**Ключевые слова:** логистика, транспортировка, длинномерный груз, перегрузка, магистральные трубы, нефтепровод, порталый кран.

**Svetlana B. Dzhakhyaeva, Ekaterina V. Klimova**

Astrakhan State Technical University (ASTU), Astrakhan, the Russian Federation

## STUDY OF THE TRANSPORTATION AND LOGISTIC SYSTEMS FOR TRANSPORTING PIPES FOR OIL PIPELINES

**Abstract.** The article discussed the logical tasks of oil main pipe transportation for pipelines. To improve efficiency of this operation has been developed the paired portal cranes operation. For estimation of proposed solution developed a computational dynamic model on the base of transshipment operations in the Astrakhan regional marine port that has a key peculiarity. There is connection with the public roads, used for heavy cargo shipments and at the same time with deep-water system of the European part of Russia, connected with international trade ways. To apply of proposed transshipment operation uses dry cargo barge, specialized articulated lorry and two port cranes by the method of the finite elements. The statistical calculation shown dynamic response under wind influence. It takes into account the stages of lifting operations, the variability of rope stiffness, engine modes, load skew, and the influence of crane operator work style peculiarities. Based on the results of the calculations it was found that proposed transshipment operation provides decline charges and accelerate the main pipe handling. At the same time the static and dynamic reactions of the portal cranes KPP 16 (20/32) do not exceed the limit levels. Finally, the model using the format of paired cranes allows improve the transshipment operation and logistic system aimed at the construction and maintenance of oil pipelines.

**Keywords:** logistics, transportation, long cargo, transshipment, main pipes, oil pipeline, portal crane.

Использование нефтедобывающих и транспортирующих установок возможно реализовать на значительной территории страны. В последние годы наблюдается устойчивая динамика роста количества вводимых в эксплуатацию транспортирующих установок. Нефтепровод являются одним из основных способов транспортировки нефтепродуктов. Система может иметь наземное и подземное расположение, а также проходить под водой. Трубопроводы данного типа имеют высокую пропускную способность и огромную протяженность.

Суммарная установленная мощность добычи нефти составляет более 535 млн т в год [1]. Государство крайне заинтересовано в развитии энергетической отрасли, в связи с чем разработан ряд программ на федеральном уровне, призванных обеспечивать непрерывное развитие чувствительной сферы рынокообразования. В нашей стране работают уже зарекомендовавшие себя и появляются новые компании, функционирующие в сфере строительства нефтепроводов, активно идет процесс создания отечественных образцов агрегатов для решения самых сложных задач отрасли. Вместе с тем вопросы транспортировки нефти не менее важны, чем ее добыча.

В разработанной Министерством транспорта Российской Федерации Транспортной стратегии, рассчитанной до 2030 года [2] особое внимание уделяется вопросам организации транспортировки с целью повышения конкурентоспособности международных транспортных коридоров, проходящих через территорию России, а также повышения эффективности внутренних транспортных путей. Достичь этого можно путем решения комплекса функциональных задач, важнейшие из которых лежат в плоскости функционирования транспортно-логистической системы.

В логистической цепочке задействовано несколько специализированных компаний, каждая из которых работает на своем отдельном участке. В зависимости от конкретных задач схема меняется, но логистическая цепочка доставки магистральных труб для нефтепровода в общем виде выглядит следующим образом: доставка от производителя в порт отгрузки → хранение и экспортное транспортное обслуживание → погрузка на судно → перевозка водным транспортом → выгрузка с судна → хранение и импортное транспортное обслуживание → доставка до места назначения автотранспортом.

Для оценки эффективности логистической системы используют комплексные показатели, которые отражают результативность использования ресурсов транспортной компании [3].

В основе системы эффективность транспортных средств, во многом зависящая от показателей объемов грузооборота и грузопереработки, показывающих эффективность использования складского подъемно-транспортного оборудования. С целью повышения результативности транспортно-логистической системы в части указанных аспектов наиболее целесообразно применять метод моделирования.

При строительстве и в процессе обслуживания магистральных нефтепроводов особенно актуален вопрос логистики перевозки и перегрузки узлов, так как их производство, как правило, находится на значительном расстоянии от места эксплуатации. Транспортные и сторонние поставщики логистических услуг должны иметь подробную техническую документацию с детальными метрическими показателями груза и фото для перевозки, чтобы обеспечить эффективные и экономичные решения. Кроме того, ощущается недостаток квалифицированных водителей. Для транспортировки компонентов от производственных объектов до площадок проекта требуются водители, которые прошли узкую специализированную подготовку, так как управление транспортным средством требует филигранной точности на всем маршруте доставки. Способы оптимизации указанных процессов при соблюдении требований безопасности активно обсуждаются специалистами [4, 5].

Логистическое звено – процесс перегрузки с одного вида транспорта на другой – характеризуется повышенной сложностью ввиду своей многофакторности. Здесь важно учитывать структуру грузооборота, различия грузоподъемности перевозочных средств, особенности управления транспортным процессом на различных видах транспорта, различия степеней технического оснащения транспортных узлов [6].

Негабаритные размеры груза требуют передового планирования поэтапно, а также тесного сотрудничества между логистической компанией, отправителями груза, государственными и федеральными органами и агентствами. Так, организация перевалки магистральных труб с водного на автомобильный транспорт является сложной комплексной задачей ввиду необходимости манипулировать длинномерным грузом с большой массой. Особенность операции заключается в подъеме и перемещении труб длиной от 25 до 30 м, центр тяжести которых расположен в центре объекта.

Процедура оценки напряжения, возникающего в элементах крана и в самой конструкции трубы, нужна для того, чтобы обезопасить процесс перемещения.

Потребность в использовании одновременно двух мостовых кранов в режиме пары появляется тогда, когда необходимо осуществить перевалку штучного груза массой больше, чем грузоподъемность одного крана [7]. Данная задача является крайне важным и одновременно технически сложным звеном логистической цепи при реализации транспортировки магистральных труб как длинномерного груза. Усложняет задачу необходимость использовать два мостовых крана. Однако такая операция не включена в перечень обязательных расчетов при проектировании, так как в прошлые десятилетия это не было востребовано. Как следствие, ответственность ложится на эксплуатационный персонал. Вместе с тем с учетом устойчивого развития нефтяной отрасли востребованность в данной операции повышается.

Обеспечение качества, скорости и безопасности при реализации указанной задачи является ключевым для создания условий бесперебойной работы всей транспортно-логистической системы транспортировки магистральных труб. Для реализации поставленной задачи была разработана модель нагружения элементов механизма подъема при перегрузке магистральных труб для нефтепровода двумя порталными кранами.

Технологический процесс перегрузки магистральных труб в порту является составной частью логистической системы транспортировки продукции, он предназначен для перевалки длинномерного штучного груза с судна на автомобильный транспорт. В рамках разработки модели в качестве примера принята схема разгрузки магистральных труб на тяжеловесный причал ООО «Терминал Бузан» Астраханской области. Рассматриваемый причал расположен в 70 км судового хода от города Астрахани, позволяет перегружать крупногабаритные грузы

весом до 300 т с сухогрузной баржи-площадки типа М70 двумя кранами КПП 16 (20/32) грузоподъемностью 32 т, ветровой район IV (рисунок 1).

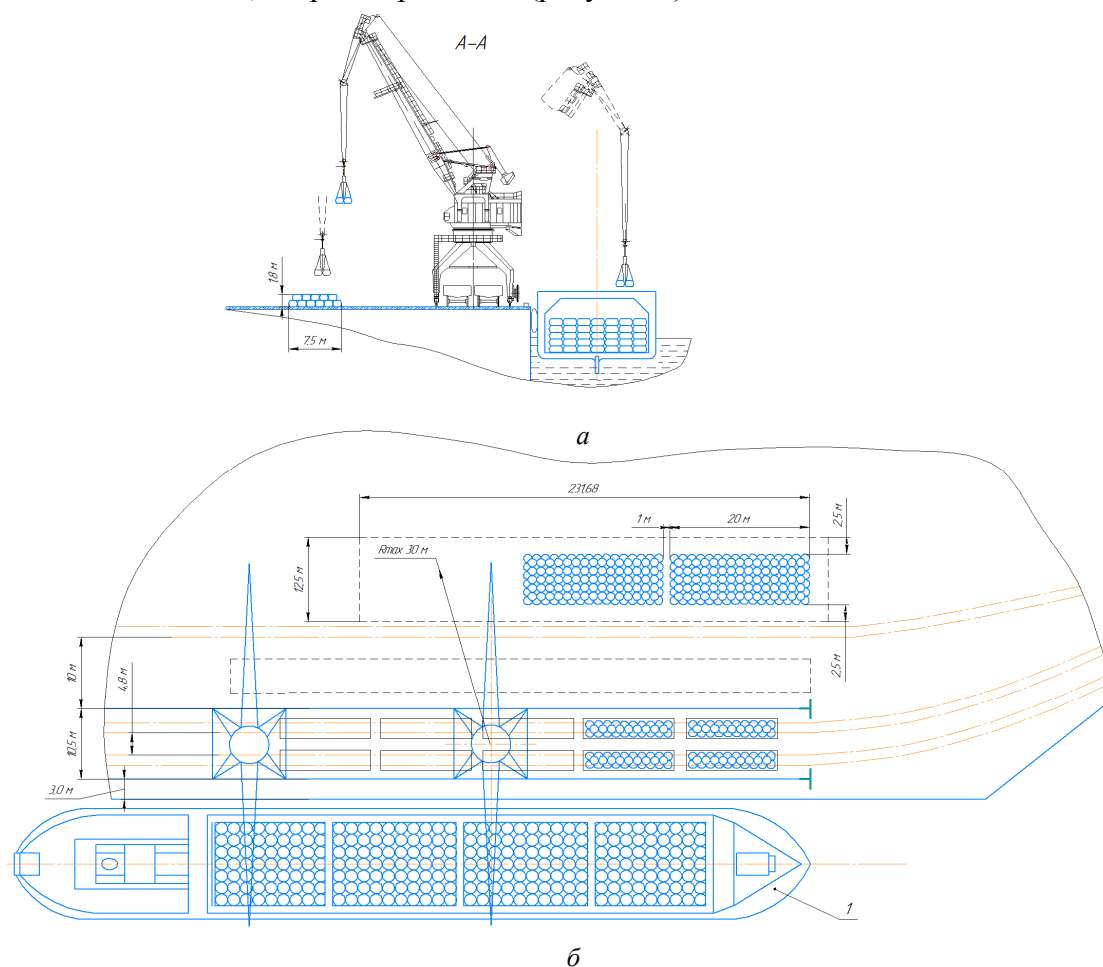


Рисунок 1 – Схема перегрузки магистральных труб нефтепровода

Грузовой порт связан автомобильной дорогой с дорогами общего пользования, по которым в настоящее время осуществляется доставка тяжеловесных грузов, а также единой глубоководной системой европейской части России со странами ближнего и дальнего зарубежья. Погрузка осуществляется на наиболее подходящий вид автотранспортного средства, применяемый для перевозки длинномерных труб – автопоезд SUPER WING CARRIER.

Магистральная труба нефтепровода представляет собой длинномерный груз с габаритными размерами 1420 мм (диаметр) × 30000 мм (длина) × 36 мм (толщина). Масса одной магистральной трубы – 8500 кг [8]. Перегрузка магистральной трубы для нефтепровода осуществляется двумя порталными кранами КПП 16 (20/32).

Разработана модель процесса перегрузки на основе метода конечных элементов. В общей системе координат  $OXYZ$  как диссипативных систем дифференциальное матричное уравнение для вынужденных колебаний конструкции имеет вид [6, 7]:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{P(t)\}, \quad (1)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[K]$  – соответственно матрица масс, демпфирования и жесткости системы;

$\{P(t)\}$  – вектор внешних нагрузок, включающий в себя эксплуатационные и динамические нагрузки, зависящий от времени;

$\{V\}$  – вектор перемещений;

$\{\dot{V}\}$  – вектор скоростей;

$\{\ddot{V}\}$  – вектор ускорений.

Уравнение (1) отражает механическую систему, которая считается линейной, если имеет место независимость параметров  $[C]$ ,  $[M]$ ,  $[K]$  от состояния системы. Решением уравнения (1) будет движение конечно-элементных узлов системы, определяющееся через векторы функций перемещения  $\{V(t)\}$ , скорости  $\{\dot{V}(t)\}$  и ускорения  $\{\ddot{V}(t)\}$ , соответствующие механической системе на определенном временном отрезке.

Частным случаем матричного уравнения является уравнение статического равновесия, соответствующее статическому расчету. Посредством данного уравнения можно определить перемещения под воздействием статических или эксплуатационных нагрузок на конструкцию схемы перегрузки. Вектор перемещения рассматриваемых узлов  $\{V\}$  конечно-элементной модели  $n$ -го порядка можно оценить с помощью системы линейных уравнений:

$$[K]\{V\} = \{R_{ст}\}, \quad (2)$$

где  $\{R_{ст}\}$  – вектор статических или эксплуатационных нагрузок;

$\{V\}$  – вектор перемещения рассматриваемых узлов;

$[K]$  – матрица жесткости конечно-элементной модели (КЭМ).

Уравнение (2) решается с помощью посредством традиционных численных методов в системе линейных уравнений.

На основе программного комплекса для расчета и проектирования строительных конструкций SAP2000 [9] с учетом технических характеристик порталного крана КПП 16 (20/32) разработанная расчетно-динамическая модель несущих конструкций порталного крана состоит из 11 конечных элементов, которые моделируют грузовой канат и оттяжку, 325 стержневых конечных элементов постоянного и переменного сечения, 253 узлов при  $n = 1518$  (количество степеней свободы) 172 пластинчатых конечных элементов, 52 жестких связей, при моделировании учитывалась постоянная нагрузка – собственный вес конструкции крана [7]. Нагрузки от собственного веса конечных элементов крана были заданы согласно плотности стали  $\rho_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$  [10] для стержневых и пластинчатых конечных элементов, а также заданной площади поперечного сечения и длине элементов. Линейная распределенная весовая нагрузка определялась на каждый конечный элемент. Собственный вес конструкций крана определялся программно.

На рисунке 2 представлена общая расчетная схема перегрузки магистральной трубы нефтепровода двумя порталными кранами КПП 16 (20/32). С целью верификации расчетных моделей выполнен статический расчет, при этом учитывалось, что порталные краны находятся в наиболее уязвимом положении по нагружению – на вылете 30 м.

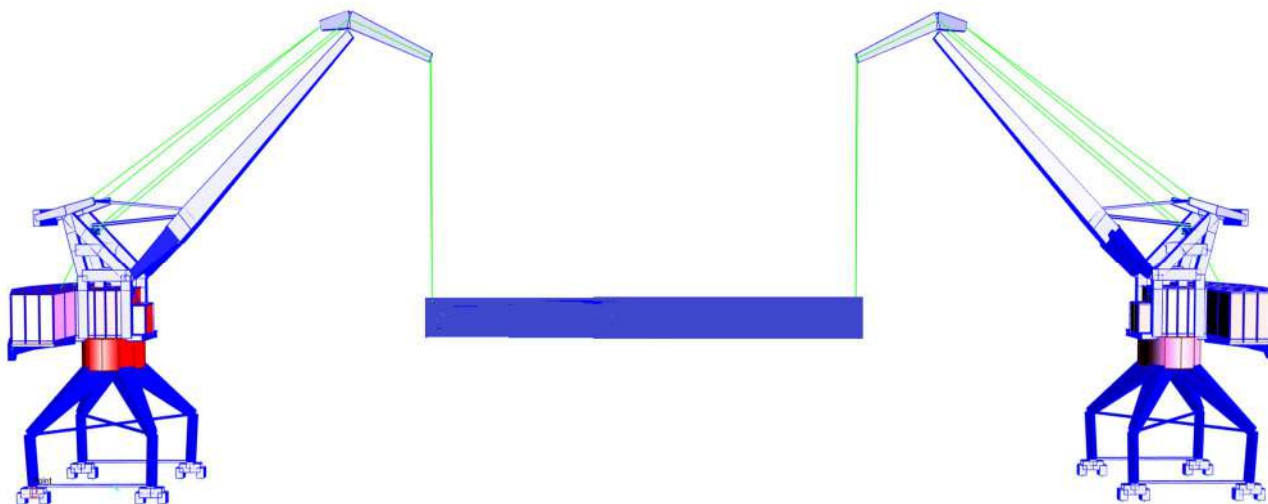


Рисунок 2 – Общая расчетная схема перегрузки магистральной трубы нефтепровода двумя порталными кранами КПП 16 (20/32)

На рисунке 3 показано деформированное состояние портальных кранов при действии статической нагрузки от магистральной трубы массой 8,5 т и с указанием продольной силы  $N$  в грузовых канатах.

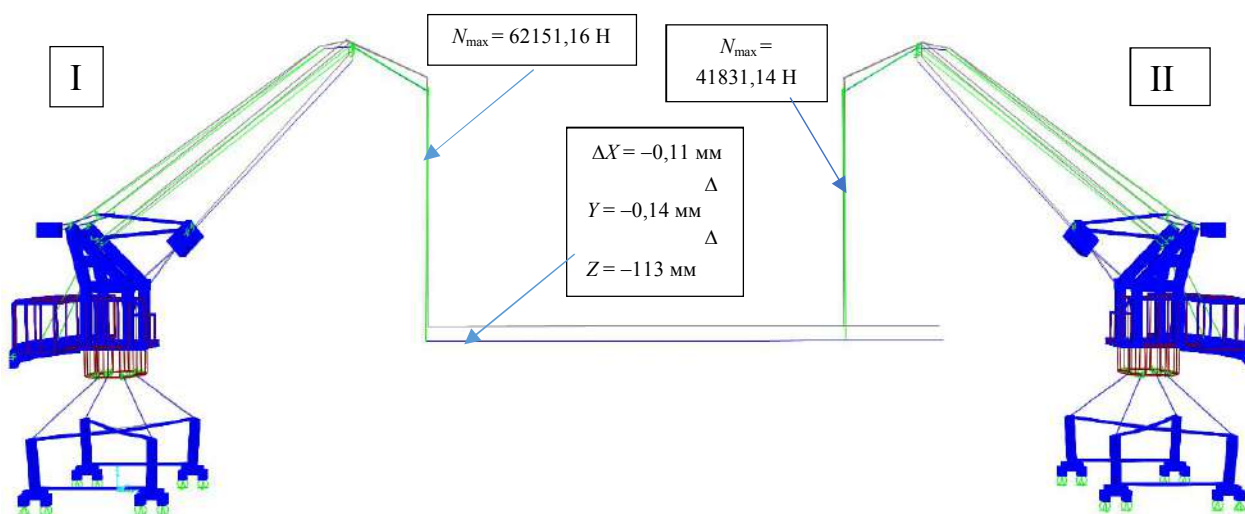


Рисунок 3 – Деформированное состояние портальных кранов при действии статической нагрузки от магистральной трубы нефтепровода

В ходе моделирования определена динамическая реакция при ветровом воздействии. Нагрузка прикладывалась на груз в горизонтальной плоскости. На рисунке 4 показано деформированное состояние кранов и перемещение груза в момент времени  $t = 0,8 \text{ с}$ , а на рисунке 5 – перемещение узла № 212 (точка подвеса груза крана II).

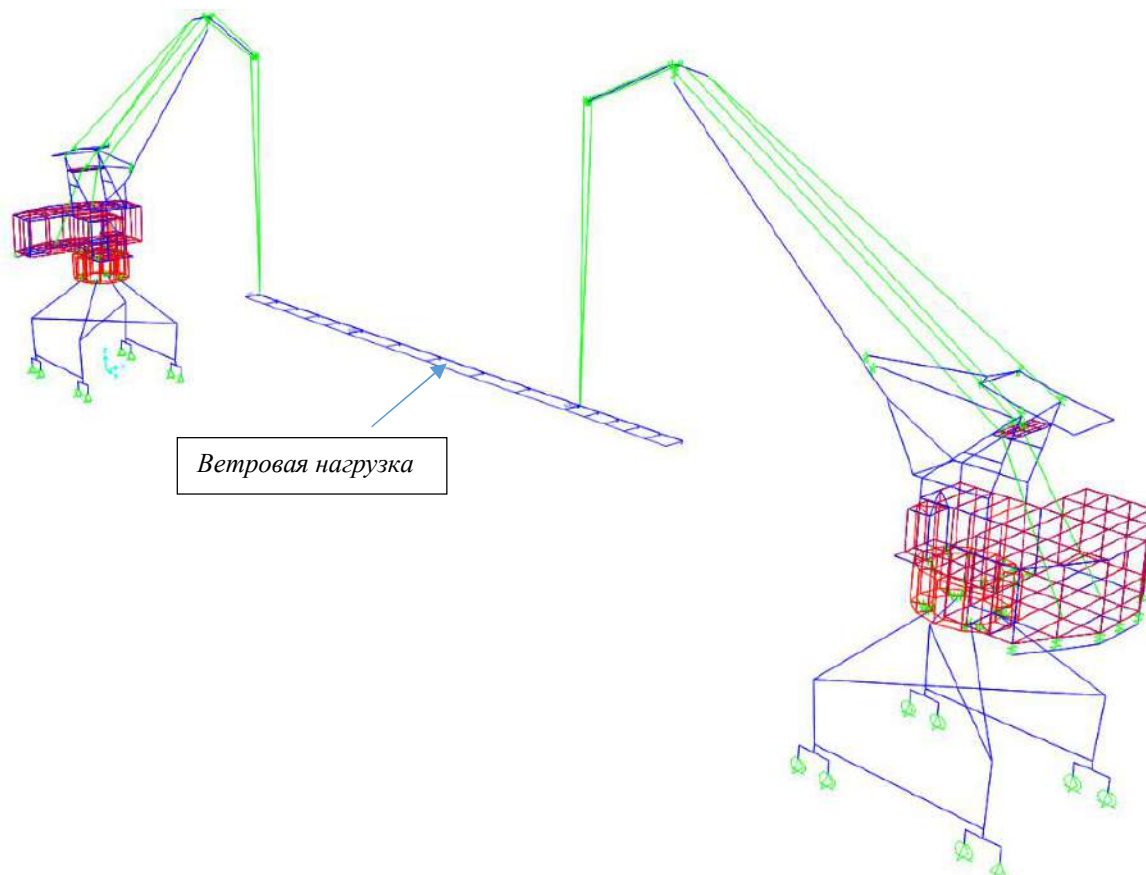


Рисунок 4 – Схема приложения ветровой нагрузки на магистральную трубу

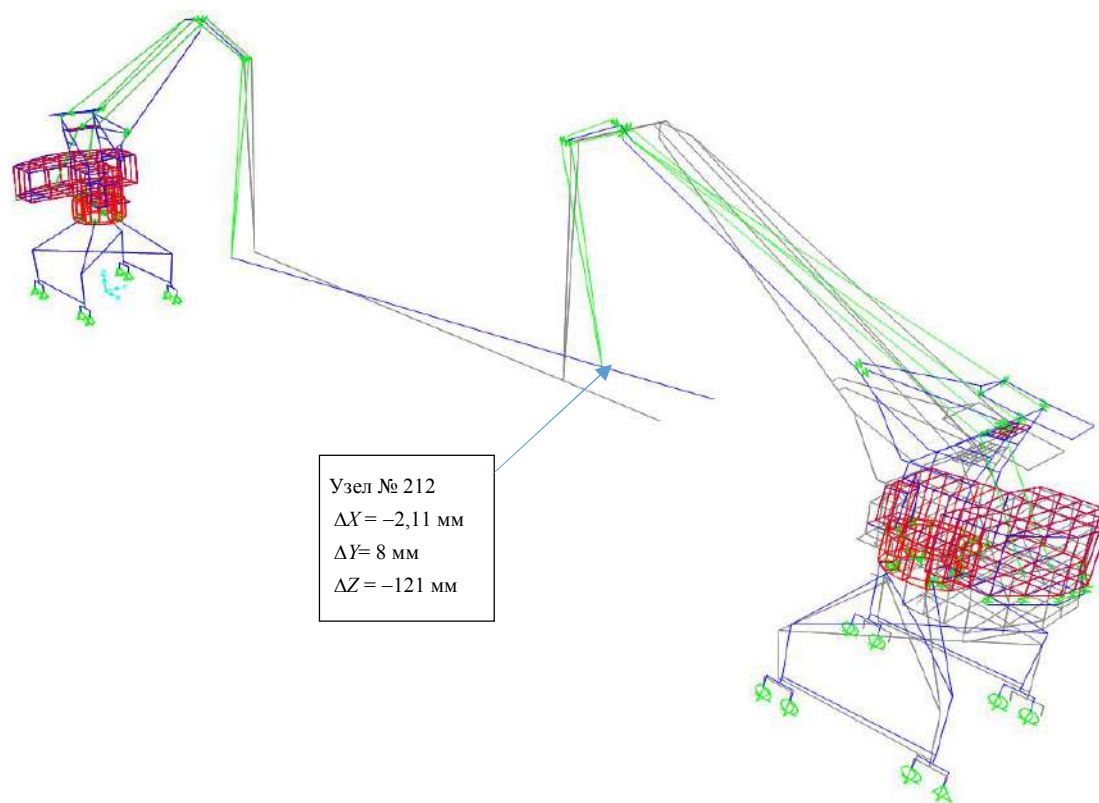


Рисунок 5 – Деформированное состояние кранов и перемещение груза при действии ветровой нагрузки на магистральную трубу нефтепровода

Проведенный статический расчет расчетного случая перегрузки магистральной трубы двумя порталными кранами КПП 16 (20/32) на вылете 30 м показал, что вертикальные перемещения груза составляют  $\Delta Z = -113$  мм. Динамический расчет модели двух порталных кранов КПП 16 (20/32) при перегрузке элемента трубопровода с учетом воздействия ветра (район IV) показал: в процессе перевалки магистральная труба нефтепровода совершает крутильные колебания с максимальным горизонтальным отклонением точки подвеса 40 мм. Статическая и динамическая реакции порталных кранов КПП 16 (20/32) не превышают предельных состояний.

Таким образом, представлена методика моделирования подъема груза двумя порталными кранами КПП 16 (20/32), учитывающая стадийность подъема, переменность жесткости каната, режимы двигателей, перекося груза, влияние стилей управления крановщиков на нагруженность [7]. Разработана расчетно-динамическая модель расчетного случая перегрузки, включающая в себя два крана КПП 16 (20/32), и представлен динамический расчет двух порталных кранов КПП 16 (20/32), перегружающих магистральную трубу нефтепровода при ветровом воздействии, соответствующем IV ветровому району.

В работе предложено решение одной из сложнейших задач в транспортно-логистической цепочке при перевозке труб для нефтепровода.

#### Список литературы

1. Как устроен российский рынок нефти // <https://gazprombank.investments> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://gazprombank.investments/blog/market/oil-russian-market/> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Транспортная стратегия // <https://mintrans.gov.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents> (дата обращения: 07.10.2024).
3. Палагин, Ю. И. Оптимальное планирование задач завоза и вывоза грузов из нескольких распределительных центров / Ю. И. Палагин. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2010. – № 2. – С. 12–15. – EDN LACKAL.

4. Гаранин, Н. П. Обеспечение безопасности работ при перемещении тяжеловесных грузов двумя спаренными кранами / Н. П. Гаранин, А. В. Раскатов, А. М. Терехов. – Текст : непосредственный // Подъемно-транспортное дело. – 2012. – № 5-6 (70). – С. 13–15. – EDN QCQLPJ.
5. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Москва : ДМК Пресс, 2007. – 600 с. – Текст : непосредственный.
6. Джахьяева, С. Б. Пути решения логистических задач по транспортировке длинномерных грузов на примере лопастей ветровых энергоустановок / С. Б. Джахьяева, Е. В. Климова. – Текст : непосредственный // Евразийский союз ученых. – 2020. – № 11-7 (80). – С. 26–31. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.7.80.1139. – EDN HRPMTD.
7. Джахьяева, С. Б. Моделирование процессов нагружения подъемно-транспортных средств при перегрузке узлов ветродвигателей / С. Б. Джахьяева, М. С. Турпищева, Е. В. Климова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (83). – С. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_18. – EDN MZAZIP.
8. Трубы для магистральных нефтепроводов // huvastroy.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://huvastroy.ru/trubyi/trubyi-bolshogo-diametra/nefteprovod/> (дата обращения: 08.10.2024).
9. SAP2000 – универсальный программный комплекс для расчета и проектирования строительных конструкций // steel-concrete.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://steel-concrete.ru/products/csi/sap2000/> (дата обращения: 10.08.2024).
10. Плотность металлов // <https://metromet.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://metromet.ru/dokumenty/plotnost-metallov/> (дата обращения: 04.06.2024).

#### References

1. *Kak ustroen rossiiskii runok nefti* [How the Russian oil market works]. Available at: <https://gazprombank.investments/blog/market/oil-russian-market/> (accessed 10.10.2024).
2. *Transportnaya strategiya* [Transport strategy]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents> (accessed 07.10.2024).
3. Palagin Yu.I. Optimal planning of cargo delivery and removal tasks from several distribution centers. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2010, no. 2, pp. 12-15. EDN LACKAL. (In Russian).
4. Garanin N.P., Raskatov A.V., Terehov A.M. Ensuring safety of works in the transshipment of heavy-weight cargoes two coupled cranes. *Pod'emno-transportnoe delo – Lift and transportation engineering*, 2012, no. 5-6 (70), pp. 13-15. EDN QCQLPJ. (In Russian).
5. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmojnost ih analiza* [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow, DMK Press Publ., 2007, 600 p. (In Russian).
6. Dzhakhiaeva S.B., Klimova K.V. Ways of solution logistic tasks of transportation the long loads for example wind turbine blades. *Evraziiskii soiuz uchenykh – Eurasian Union of Scientists*, 2020, no. 11-7 (80), pp. 26-31. DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.7.80.1139. EDN HRPMTD. (In Russian).
7. Dzhakhiaeva S.B., Turpishcheva M.S., Klimova E.V. Modeling of loading processes of lifting vehicles when overloading wind engine units. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2021, no. 3 (83), pp. 18-25. DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_18. EDN MZAZIP. (In Russian).
8. *Trybu dlya magistralnuh nefteprovodov* [The pipes for main oil pipelines]. Available at: <https://huvastroy.ru/trubyi/trubyi-bolshogo-diametra/nefteprovod/> (accessed: 08.10.2024).
9. *SAP2000 – universal'nyi programmnyi kompleks dlia rascheta i proektirovaniia stroitel'nykh konstruktsii* [SAP2000 is a universal software package for calculation and design of building structures]. Available at: <https://steel-concrete.ru/products/csi/sap2000/> (accessed: 10.08.2024).
10. *Plotnost' metallov* [Density of metals]. Available at: <https://metromet.ru/dokumenty/plotnost-metallov/> (accessed: 04.06.2024).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Джахьяева Светлана Борисовна

Астраханский государственный технический университет (АГТУ).

Татищева ул., д. 16, г. Астрахань, 414025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт», АГТУ.

Тел.: +7 (908)-612-01-49.

E-mail: psb1976@yandex.ru

### Климова Екатерина Владимировна

Астраханский государственный технический университет (АГТУ).

Татищева ул., д. 16, г. Астрахань, 414025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт», АГТУ.

Тел.: +7 (909)-375-59-43.

E-mail: katuwaastu@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Джахьяева, С. Б. Исследование транспортно-логистической системы транспортировки магистральных труб для нефтепровода / С. Б. Джахьяева, Е. В. Климова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 87 – 95.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Dzhakhyaeva Svetlana Borisovna

Astrakhan State Technical University (ASTU).

16, Tatistcheva, st., Astrakhan, 414025, the Russian Federation

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «General engineering disciplines and ground transport», ASTU.

Phone: +7 (908)-612-01-49.

E-mail: psb1976@yandex.ru

### Klimova Ekaterina Vladimirovna

Astrakhan State Technical University (ASTU).

16, Tatistcheva, st., Astrakhan, 414056, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «General engineering disciplines and ground transport», ASTU

Phone: +7 (909)-375-59-43.

E-mail: katuwaastu@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Dzhakhyaeva S.B., Klimova E.V. Study of the transportation and logistic systems for transporting pipes for oil pipelines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 87-95. (In Russian).

УДК 629.423.31

## Ф. В. Тихонов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), г. Москва, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Аннотация.** Целью работы является рассмотрение вариантов повышения эффективности использования асинхронных тяговых электродвигателей, повышения их надежности и увеличения ресурса. Исследование проводилось с помощью математической модели, учитывающей конструктивные особенности элементов асинхронного тягового электродвигателя и позволяющей с достаточной точностью рассчитать токи, потери мощности в отдельных элементах конструкции двигателя, а также момент и мощность на валу. Моделирование выполнялось для асинхронного тягового двигателя ДАТ-470, однако данная математическая модель позволяет выполнить расчеты для любого асинхронного двигателя аналогичной конструкции при условии задания соответствующих исходных данных. При проведении исследования рассматривалось применение в качестве материала для изготовления сердечников статора и ротора железокобальтового сплава с содержанием кобальта 48 %, известного также как пермендюр, обладающего более высоким значением индукции насыщения по сравнению с кремниевыми сталями, а именно 2,3 Тл, достигаемым при значительно меньшем значении напряженности магнитного поля. В результате исследования установлено, что применение железокобальтового сплава без повышения допустимого значения индукции в отдельных сечениях магнитопровода позволяет снизить ток фазы на 6 % за счет меньшего тока намагничивания

по сравнению с двигателем с магнитопроводом из кремниевой стали. Очевидно, что снижение тока в обмотке положительно скажется на тепловом состоянии изоляции и ее надежности и ресурсе. При повышении допустимого значения магнитной индукции и увеличении питающего напряжения достигнуто повышение крутящего момента на валу на 25 %. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов и моторвагонного подвижного состава с целью получения оптимального сочетания тяговых свойств и надежности привода.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, железокобальтовый сплав, пермендюр, магнитное поле, увеличение мощности, магнитная система, насыщение магнитопровода.

**Philipp V. Tikhonov**

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, the Russian Federation

## STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF FERROMAGNETIC MATERIALS ON THE CHARACTERISTICS OF THE INDUCTION TRACTION ELECTRIC MOTOR

**Abstract.** The aim of the work is to consider options for increasing the efficiency of using asynchronous traction electric motors, as well as increasing their reliability and increasing their service life. The study was conducted using a mathematical model that takes into account the design features of the elements of the asynchronous traction electric motor and allows for sufficiently accurate calculation of currents, power losses in individual elements of the motor design, as well as torque and power on the shaft. The modeling was performed for the asynchronous traction motor DAT-470. The study considered the use of an iron-cobalt alloy with a cobalt content of 48% as a material for manufacturing the stator and rotor cores. It has a higher saturation induction value compared to silicon steels, namely 2.3 T, achieved at a significantly lower magnetic field strength. The study found that the use of an iron-cobalt alloy without increasing the permissible induction value in individual sections of the magnetic circuit allows for a 6% reduction of the phase current due to a lower magnetization current. It is obvious that a reduction in the winding current will have a positive effect on the thermal state of the insulation, its reliability and service life. With an increase in the permissible magnetic induction value and an increase in the supply voltage, a 25% increase in the shaft torque was achieved. The results obtained can be used in the design of asynchronous traction motors for locomotives and multiple unit rolling stock in order to achieve an optimal combination of traction properties and drive reliability.

**Keywords:** induction motor, high saturation, iron-cobalt alloy, magnet field, power increase, magnet system, vacoflux.

Мировой опыт использования асинхронных электродвигателей в качестве тяговых на железнодорожном подвижном составе показал ряд их преимуществ по сравнению с коллекторными электродвигателями постоянного тока. К основным преимуществам асинхронных электродвигателей относятся простота конструкции и обслуживания и меньшие габаритные размеры по сравнению с двигателем постоянного тока равной мощности. В настоящее время на сети железных дорог Российской Федерации в соответствии со Стратегией научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2020 и перспективу до 2025 года осуществляется внедрение локомотивов и моторвагонного подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). В их число входят электровозы 2ЭС5С, 3ЭС5С «Атаман» с двигателями ДТА-1100, тепловоз 2ТЭ25А с двигателями ДТА-350Т и АД917УХЛ1 и электропоезда серии ЭС, ЭВС. Кроме того, разрабатываются новые модели АТД, например, ТАД430, созданный ООО «Электротяжмаш-Привод» (г. Лысьва) для тепловоза 2ТЭ35А [1], а также ДТА-380, разработанный входящим в АО «Трансмашхолдинг» инжиниринговым центром «ГМХ Инжиниринг» для современных электропоездов «Иволга 3.0» [2, 3]. Наряду с вопросами, связанными с разработкой преобразователей и систем управления тяговым приводом, актуален вопрос о возможности улучшения характеристик АТД, в частности, повышения удельной мощности АТД, что позволит при неизменных габаритных размерах

повысить крутящий момент на валу и силу тяги на колесных парах тягового подвижного состава.

В представленной статье рассмотрен вопрос влияния химического состава электротехнической стали, используемой для изготовления магнитопроводов статора и ротора, на характеристики АД. Известно, что ферромагнитные материалы обладают свойством насыщения, при достижении которого ограничивается магнитный поток в сердечнике. У широко применяемых в электромашиностроении кремниевых сталей переход характеристики в зону насыщения происходит при индукции 1,4 – 1,8 Тл, а допустимые значения магнитной индукции в зависимости от исполнения двигателя лежат в следующих диапазонах, Тл:

- в зубцах статора – 1,6 – 1,9;
- в ярме статора – 1,15 – 1,6;
- в зубцах ротора – 1,75 – 1,85;
- в ярме ротора – до 1,45.

Указанные ограничения определяют площади сечения участков магнитопроводов, что влияет на геометрические размеры элементов конструкции и массогабаритные показатели двигателя.

Более высокое значение индукции, при котором происходит насыщение магнитной системы, может быть достигнуто применением ферромагнитных материалов другого состава, например, железокобальтовых сплавов. Содержание кобальта в сплаве может варьироваться в диапазоне от 17 до 50 %, что обуславливает механические и магнитные свойства материала. Так, максимальное значение индукции имеет сплав с содержанием кобальта 27 %, однако при этом он имеет недостаточно высокие прочность и пластичность. Для их увеличения требуется легирование хромом, марганцем, кремнием и никелем в общем количестве 2,0 – 2,5 % [4].

В ряде зарубежных публикаций [5, 6] представлены результаты исследований работы электрических машин с магнитопроводами из железокобальтовых сплавов. Исследователи указывают на возможность увеличения мощности не менее чем на 10 %, в том числе у двигателей электромобилей.

Железокобальтовые сплавы российских производителей имеют обозначения 27КХ, 49КФ, 49К2Ф, 49К2ФА; их состав и свойства регламентированы [7, 8], однако в справочной литературе не представлены кривые намагничивания, что не позволяет рассмотреть динамику изменения индукции до уровня насыщения.

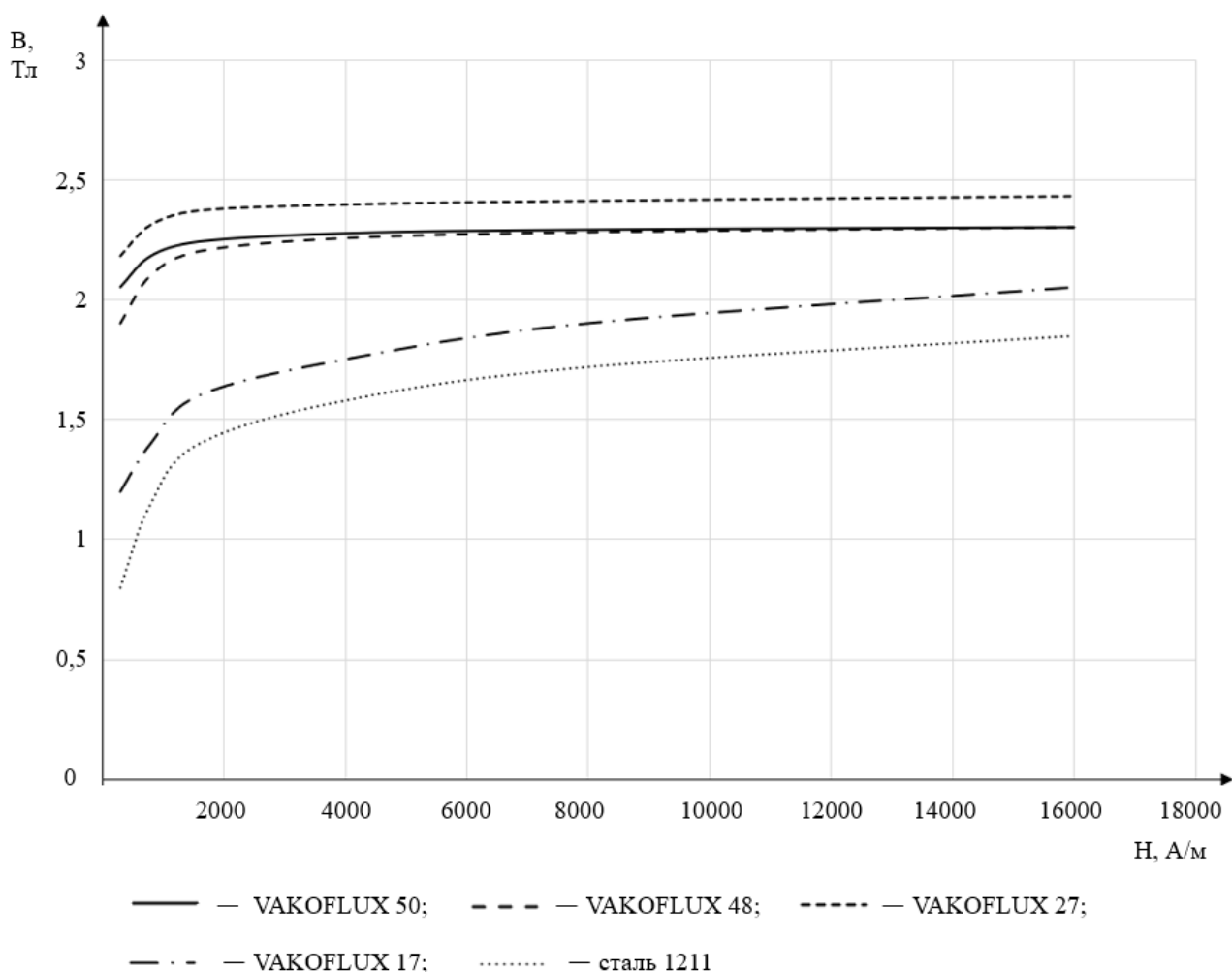
На европейском рынке представлены сплавы серий VACOFLUX и VACODUR производства VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, Германия [9]. Данные серии сплавов могут иметь одинаковое процентное соотношение железа и кобальта, но вследствие легирования разными элементами различаются их магнитные и прочностные характеристики, что определяет сферу их применения – VACODUR характеризуется большей прочностью и рекомендован для применения в быстроходных электромашинах, а VACOFLUX имеет лучшие магнитные характеристики и может быть применен в тихоходных машинах средней и большой мощности.

Сравнение кривых намагничивания проводилось в диапазоне изменения напряженности от 300 до 16000 А/м. Как видно из представленных на рисунке графиков, достижение магнитной индукцией значения 2 Тл у железокобальтовых сплавов происходит при напряженности порядка 250 – 12000 А/м, тогда как у кремниевых сталей согласно справочным данным при 30000 А/м. Очевидно, что в первом случае требуется меньшая магнитодвижущая сила и, следовательно, меньшая сила тока.

Согласно рекомендациям производителя [9] имеющий максимальный уровень насыщения сплав VACOFLUX 27 может применяться в магнитопроводах с постоянным магнитным потоком. Для магнитопроводов статоров и роторов электрических машин переменного тока наиболее подходящим является сплав VACOFLUX 48, имеющий следующие характеристики:

- химический состав – 49 % Fe, 49 % Co, 2 % V;
- плотность – 8120 кг/м<sup>3</sup>;

- индукция насыщения – 2,35 Тл;
- удельные магнитные потери при индукции 2,0 Тл и частоте 50 Гц – 1,5 Вт/кг;
- предел текучести – 190 МПа;
- предел прочности – 220 МПа.



Кривые намагничивания сталей с различным химическим составом

Для проведения исследования влияния состава стали на характеристики АД использовалась математическая модель асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-470, производимого ООО «Электротяжмаш-Привод» (г. Лысьва). Задачей расчета являлось сравнение параметров работы двигателя на номинальном режиме при использовании в магнитопроводах статора и ротора ферромагнитных сплавов различного состава. При моделировании проведен расчет магнитной цепи двигателя с учетом особенностей формы зубцов статора и ротора. Для зубцового слоя статора магнитная индукция определялась на высоте 1/3 высоты зубца

$$S_{z1} = k_c b_{1-1/3} \frac{Z_1}{2p} \alpha_\delta I_a, \quad (1)$$

- где  $b_{1-1/3}$  – ширина зубца;  
 $Z_1$  – количество зубцов статора;  
 $2p$  – количество полюсов статора;  
 $\alpha_\delta$  – коэффициент полюсного перекрытия;  
 $l_a$  – активная длина статора;  
 $k_c$  – коэффициент заполнения сердечника сталью.

Площадь сечения ярма статора определялась так:

$$S_{a1} = k_c \left( \frac{D_a' - D_{1вн} - 2h_{z1}}{2} \right) l_a, \quad (2)$$

где  $D_a'$  – усредненный наружный диаметр статора;

$D_{1вн}$  – внутренний диаметр статора;

$h_{z1}$  – высота зубца статора.

Площадь сечения ярма ротора определялась с учетом наличия вентиляционных каналов:

$$S_{a2} = k_c \left( \frac{D_2 - D_{2вн} - 2h_{z2} - 1,33n_k d_k}{2} \right) l_a, \quad (3)$$

где  $D_2$  – наружный диаметр ротора;

$D_{2вн}$  – внутренний диаметр ротора;

$h_{z2}$  – высота зубца ротора;

$n_k$  – число рядов вентиляционных каналов;

$d_k$  – диаметр вентиляционных каналов.

По результатам расчета напряженности магнитного поля  $H$  и магнитодвижущей силы на отдельных участках магнитной цепи определялся коэффициент насыщения  $k_H$  с целью определения коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha_\delta$  и эффективности использования зубцовой зоны машины.

$$k_H = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}. \quad (4)$$

В случае  $k_H > 1,5 \div 1,6$  зубцовая зона чрезмерно насыщена, а если  $k_H < 1,2$ , то сечение зубцовой зоны недоиспользуется.

Расчет активных сопротивлений обмоток статора и ротора определялся с учетом изменения температуры проводника и, как следствие, изменения его сопротивления. В качестве рабочей температуры принята 115 °С, изменение температуры как функции от силы тока не учитывалось.

Активное сопротивление обмоток определялось с учетом эффекта вытеснения тока от каждой гармонической составляющей. Коэффициент увеличения активного сопротивления (Фильда) при этом рассчитывался по зависимости:

$$K_{\Phi v} = \left[ \left( \phi(\xi) + \frac{n_p^2 - 1}{3} \cdot \psi(\xi) \right) - 1 \right] \cdot \frac{l_a}{l_s + l_a} + 1, \quad (5)$$

где  $n_p$  – количество элементарных проводников в пазу;

$l_a$  – активная длина АД;

$l_s$  – длина проводника катушки.

$$\phi(\xi) = \xi \cdot \frac{sh 2\xi + \sin 2\xi}{ch 2\xi - \cos 2\xi}, \quad (6)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \cdot \frac{sh \xi - \sin \xi}{ch \xi + \cos \xi}, \quad (7)$$

где  $\xi$  – приведенная высота проводника статора,

$$\xi = h_{ПР} \cdot \sqrt{\frac{b_{ПР} \cdot \lambda_{ПР}}{2 \cdot b_{П}} \cdot \mu_0 \cdot \omega_v}, \quad (8)$$

где  $h_{ПР}$ ,  $b_{ПР}$  – высота и ширина элементарного проводника соответственно;

$b_{\Pi}$  – ширина паза;

$\omega_n$  – угловая скорость  $i$ -й гармоники.

Индуктивные сопротивления обмоток для соответствующих гармоник определены с помощью коэффициента уменьшения реактивного сопротивления  $K_{Xv}$ :

$$K_{Xv} = \left[ \left( \frac{1}{n_p^2} \cdot \phi(\xi) + \frac{n_p^2 - 1}{n_p} \cdot \psi(\xi) \right) - 1 \right] \cdot \frac{l_a}{l_s + l_a} + 1. \quad (9)$$

Основными потерями в АД являются электрические и добавочные потери в обмотках, магнитные в сердечнике статора, аэродинамические и механические на роторе и в подшипниковых щитах.

Электрические потери в обмотке статора определялись согласно зависимости:

$$P_{\text{обм1}} = I_{\phi}^2 \cdot Z \cdot l_{\text{пр}} \cdot R^{(20)} \cdot \left[ 1 + \alpha_R \cdot (T_{\text{раб}} - 20) \right], \quad (10)$$

где  $P_{\text{обм1}}$  – электрические потери в обмотке;

$I_{\phi}$  – фазный ток;

$Z$  – количество проводников в пазу;

$R^{(20)}$  – сопротивление проводника при 20 °С;

$\alpha_R$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки;

$T_{\text{раб}}$  – температура проводника.

Основные потери в стали рассчитывались как сумма потерь в ярме и зубцовом слое:

$$P_{\text{ст1}} = C_{\Pi} \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \cdot p_{10/50} \cdot (m_{31} \cdot B_{31}^2 + m_{я1} \cdot B_{я1}^2), \quad (11)$$

где  $C_{\Pi}$  – коэффициент, зависящий от формы пазов;

$p_{10/50}$  – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц;

$m_{31}$  – масса стали зубцового слоя сердечника статора;

$m_{я1}$  – масса стали ярма сердечника статора;

$B_{31}$  – индукция в зубцах сердечника статора;

$B_{я1}$  – индукция в ярме сердечника статора.

Сопротивление обмотки ротора определялось с учетом эффекта вытеснения тока. Вытеснение тока практически происходит только в пазовой части обмотки ротора. Поэтому выражения для активного  $r'_2$  и индуктивного  $x'_2$  сопротивлений имеют вид:

$$r'_2 = k_r \cdot r'_{2\text{п}} + r'_{2\text{л}}; \quad (12)$$

$$x'_2 = k_x \cdot x'_{2\text{п}} + x'_{2\text{л}}, \quad (13)$$

где  $r'_{2\text{п}}$  и  $x'_{2\text{п}}$  – сопротивления пазовой части обмотки;

$r'_{2\text{л}}$  и  $x'_{2\text{л}}$  – сопротивления участков короткозамыкающих колец между соседними стержнями;

$k_r$  и  $k_x$  – коэффициенты, учитывающие изменение активного и индуктивного сопротивлений стержня под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$k_r = \xi \cdot \frac{\text{sh}2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch}2\xi - \cos 2\xi}; \quad (14)$$

$$k_x = \frac{3}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{\text{sh}2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch}2\xi - \cos 2\xi}, \quad (15)$$

где  $\xi$  – приведенная высота стержня,

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \sqrt{\frac{s \cdot f_1 \cdot b}{10 \cdot \rho \cdot b_{\Pi}}}, \quad (16)$$

где  $h$  – высота стержня;

$s$  – скольжение;

$\rho$  – удельное сопротивление материала стержня;

$b$  – ширина стержня;

$b_{\Pi}$  – ширина паза.

В связи с тем, что в напряжении питания электродвигателя присутствуют высшие гармонические составляющие, кроме основных электрических потерь возникают добавочные. Для определения добавочных потерь рассчитывались параметры схем замещения с учетом вытеснения тока в обмотках для соответствующих гармонических составляющих тока. Потери в обмотках определялись зависимостями:

для обмотки статора –

$$\Delta P_{M1v} = m_1 \cdot I_{\Phi 1v}^2 \cdot r_{1v}, \quad (17)$$

где  $I_{\Phi 1v}$  – значение фазного тока для  $i$ -й гармоники;

$r_{1v}$  – активное сопротивление обмотки статора для  $i$ -й гармонической составляющей;

для обмотки ротора –

$$\Delta P_{M2v} = m_1 \cdot I_{\Phi 1v}^2 \cdot \frac{r_2'}{s_v}, \quad (18)$$

где  $s_v$  – относительное скольжение для  $i$ -й гармонической составляющей.

$r_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам статора для  $i$ -й гармонической составляющей.

Электромагнитный момент определялся как функция трансформаторной ЭДС роторной обмотки:

$$M_{эм} = \frac{3}{\omega_2} \frac{s \cdot E_{2н\text{еп}}^2 \cdot R_2}{\left[ (R_2)^2 + (sx_{2н\text{еп}})^2 \right]}, \quad (19)$$

где  $E_{2н\text{еп}}$  – трансформаторная ЭДС при неподвижном роторе;

$x_{2н\text{еп}}$  – индуктивное сопротивление роторной обмотки при неподвижном роторе.

Крутящий момент  $M_2$  рассчитывался как отношение мощности  $P_2$  к угловой скорости вращения ротора  $\omega_2$ .

Проведенный расчет показал, что в серийном двигателе с магнитопроводом из кремниевой стали при магнитном потоке  $\Phi = 0,065$  Вб индукция в зубцах статора составляет 1,6 Тл и в зубцах ротора 1,46 Тл, коэффициент насыщения  $k_H$  имеет значение 1,06. Магнитодвижущая сила  $F_m = 2396$  А создается током намагничивания  $I_\mu = 131$  А, при этом ток фазы  $I_\phi$  составляет 392 А. Потери в стали при частоте питающего напряжения 30,33 Гц составили 4787 Вт. В результате двигатель реализует выходную мощность  $P_2 = 449364$  Вт, а крутящий момент  $M_2$  при частоте вращения ротора  $443 \text{ с}^{-1}$  равен 9694 Н·м.

Во втором варианте рассматривается применение в магнитопроводе шихтованной стали из сплава VACOFLUX 48. При аналогичных значениях магнитного потока и индукции на отдельных участках магнитной цепи магнитодвижущая сила составила 1443 А и ток намагничивания уменьшился до 79 А, что ниже полученных в первом случае результатов на 40 %. Как следствие, сила фазного тока двигателя снизилась на 6 % до значения 368 А. Из-за меньших удельных потерь в рассматриваемом сплаве потери в стали также снизились на 32 %. Мощность и крутящий момент вследствие снижения потерь увеличились на 1,2 % и составили 454861 Вт и 9789 Н·м соответственно.

Снижение фазного тока позволит снизить тепловые потери статорной обмотки и ее температуру, что благоприятно скажется на условиях работы изоляции, снизится интенсивность ее старения, повысится надежность двигателя в целом.

Так как рассматриваемый сплав имеет более высокое значение индукции насыщения, то могут быть установлены соответствующие значения индукции для отдельных участков магнитной цепи – зубцов и ярма статора и ротора. Повышение индукции за счет уменьшения сечений зубцов и ярма не рассматривалось, так как их ширина обусловлена механической прочностью магнитопровода. Повышение индукции осуществлялось увеличением магнитного потока за счет повышения питающего напряжения до достижения магнитной индукцией в зубцах статора  $B_{з1}$  значения 2,0 Тл, что превышает рассчитанное ранее значение на 25 %. В таблице представлены результаты расчетов.

Результаты расчета

Параметры	Фазное напряжение $U_{ф}$ , В				
	495	525	550	575	610
Магнитный поток $\Phi$ , Вб	0,065	0,06916	0,07245	0,07575	0,08036
Индукция в зубцах статора $B_{з1}$ , Тл	1,6	1,72	1,8	1,88	2
Индукция в зубцах ротора $B_{з2}$ , Тл	1,46	1,54	1,62	1,7	1,8
Индукция в ярме статора $B_{яр1}$ , Тл	1,92	2,04	2,14	2,24	2,37
Индукция в ярме ротора $B_{яр2}$ , Тл	0,8	0,85	0,89	0,93	0,98
Индукция в воздушном зазоре $B_{\delta}$ , Тл	0,7	0,75	0,78	0,82	0,87
Коэффициент насыщения $k_n$	1,047	1,049	1,051	1,054	1,062
Магнитодвижущая сила $F_m$ , А	1443	1572	1715	1960	2279
Ток намагничивания $I_{\mu}$ , А	79	86	94	107	125
Реактивная составляющая тока фазы $I_p$ , А	164	170,8	178,1	189,8	206
Активная составляющая тока фазы $I_a$ , А	329	337,7	345,3	350,5	360
Ток фазы $I_{ф}$ , А	368,4	378	388,5	398,6	415
Мощность на валу двигателя $P_2$ , Вт	454861	493065	527661	559158	607484
Крутящий момент $M_2$ , Н·м	9789	10637	11383	12062	13105

В результате проведенного исследования установлено, что применение в конструкции асинхронных тяговых электродвигателей магнитопроводов из железокобальтового сплава позволяет снизить токи фаз при номинальном напряжении более чем на 5 %, что уменьшит тепловую нагрузку на обмотку статора и повысит надежность двигателя. Для более полного использования сечения участков магнитной цепи может быть увеличен магнитный поток без перенасыщения машины, вследствие чего крутящий момент на валу возрастает на 25 %.

### Список литературы

1. Асинхронный двигатель для нового магистрального тепловоза СТМ прошел приемочную комиссию // [sinara-group.com](https://sinara-group.com) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.sinara-group.com/media/news/asinkhronnyy-dvigatel-dlya-novogo-magistralnogo-teplovoza-stm-proshel-priemochnuyu-komissiyu/> (дата обращения: 14.09.2024).
2. Создан новый отечественный асинхронный тяговый двигатель для электропоездов «Иволга» // [gudok.ru](https://gudok.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://gudok.ru/news/press/?ID=1622850> (дата обращения: 14.09.2024).
3. «ТМХ-Электротех» сертифицировал новые асинхронные тяговые двигатели для новых электропоездов «Иволга» // [tmholding.ru](https://tmholding.ru) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://tmholding.ru/media/events/32214.html> (дата обращения: 14.09.2024).

4. Volbers, N., & Gerster, J. (2012). High saturation high strength iron-cobalt alloy for electrical machines. *Proceedings of the INDUCTICA, CWIEME Berlin*.
5. Epskamp, T. (2020). *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine* (Doctoral dissertation, Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020).
6. Brand, R., Stahel, L. B., Vezzini, A., & Baselgia, L. (2011). Tuning für Elektromotoren. Optimierung eines Hochleistungs-Permanentmagnetmotors durch Verwendung von Kobalt-Eisen-Blechpaketen. *Antriebstechnik*, 5, 68-70.
7. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат и калиброванная сталь. – Москва : Издательство стандартов, 2004. – Ч. 2. – Раздел «ГОСТ 10994–74. Сплавы прецизионные. Марки». – С. 116–132. – Текст : непосредственный.
8. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат и калиброванная сталь. – Москва : Издательство стандартов, 2004. – Ч. 3. – Раздел «ГОСТ 10160–75. Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия». – С. 3–47. – Текст : непосредственный.
9. (Vacuumschmelze GmbH & Co. KG) N.N., “Soft magnetic Cobalt-iron Alloys.” Vacuumschmelze, Hanau, 2016.

## References

1. *Asynhronnyi dvigatel dlya novogo magistralnogo teplovoza STM proshel priemochnuyu komissiyu* [Asynchronous motor for new mainline diesel locomotive STM passed acceptance committee]. Available at: <https://www.sinara-group.com/media/news/asinkhronnyy-dvigatel-dlya-novogo-magistralnogo-teplovoza-stm-proshel-priemochnuyu-komissiyu/> (accessed 14.09.2024).
2. *Sozdan noviy otechestvenniy asynhronnyi tyagoviy dvigatel dlya electropoezdov «Ivolga»* [A new domestic asynchronous traction motor for Ivolga electric trains has been created]. Available at: <https://gudok.ru/news/press/?ID=1622850> (accessed 14.09.2024).
3. *«TMH-Electrotech» sertifiziroval novie asinhronnie tyagovie dvigateli dlya novih electropoezdov «Ivolga»* [TMH-Electrotech has certified new asynchronous traction motors for the new Ivolga electric trains]. Available at: <https://tmholding.ru/media/events/32214.html> (accessed 14.09.2024).
4. Volbers, N., & Gerster, J. (2012). High saturation high strength iron-cobalt alloy for electrical machines. *Proceedings of the INDUCTICA, CWIEME Berlin*.
5. Epskamp, T. (2020). *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine* (Doctoral dissertation, Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020).
6. Brand, R., Stahel, L. B., Vezzini, A., & Baselgia, L. (2011). Tuning für Elektromotoren. Optimierung eines Hochleistungs-Permanentmagnetmotors durch Verwendung von Kobalt-Eisen-Blechpaketen. *Antriebstechnik*, 5, 68-70.
7. The quality and high-quality steel. Long and shaped rolled products and calibrated steel. Part 2. Section “GOST 10994-74. Precision alloys. Grades”. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2004, pp. 116-132. (In Russian).
8. The quality and high-quality steel. Long and shaped rolled products and calibrated steel. Part 3. Section “GOST 10160-75. Magnetically soft precision alloys. Specifications”. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2004, pp. 3-47. (In Russian).
9. (Vacuumschmelze GmbH & Co. KG) N.N., “Soft magnetic Cobalt-iron Alloys.” Vacuumschmelze, Hanau, 2016.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Тихонов Филипп Владимирович**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ).

Волоколамское шоссе, д. 4, 125993, г. Москва, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», МАИ.

Тел.: +7 (910)-464-83-71.

E-mail: tikhonov\_fv@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tikhonov Philipp Vladimirovich**

Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI).

4, Volokolamckoe shosse, Moscow, 125993, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department 310 «Electrical power, Electromechanical and Biotechnical Systems», MAI.

Phone: +7 (910)-464-83-71.

E-mail: tikhonov\_fv@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тихонов, Ф. В. Исследование влияния химического состава ферромагнитных материалов на характеристики асинхронного тягового электродвигателя / Ф. В. Тихонов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 95 – 104.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tikhonov Ph.V. Study of the influence of chemical composition of ferromagnetic materials on the characteristics of the induction traction electric motor. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 95-104. (In Russian).

УДК 697.3:621.577.001

**А. П. Полозкова, А. С. Гусаров**

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДЯНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ СТАГНАЦИИ

**Аннотация.** Целью исследования является выявление технических проблем в эксплуатации гелиооборудования, препятствующих широкому внедрению систем. Рассмотрены проблемы с перегревом теплоносителя в водяных солнечных коллекторных системах – особый режим в работе оборудования называется стагнацией. Представлены этапы развития режима стагнации и дан анализ влияния каждого этапа на параметры водяных солнечных коллекторных систем. Выявлено, что режим стагнации негативно влияет на компоненты водяных солнечных коллекторных систем, сокращает срок службы или повреждает их. Основным негативным фактором является высокая температура образовавшегося пара в коллекторе при перегреве системы. После проведения экспериментов сделан вывод (что согласуется с исследованиями в этой области) о том, что жидкий теплоноситель, остающийся в коллекторе при недостаточном опорожнении системы, будет формировать высокотемпературный пар, повреждающий компоненты. Главным методом снижения влияния высокой температуры на компоненты является полное своевременное опорожнение коллекторной системы. Предложены технические решения для улучшенного опорожнения таких систем, а также технические решения, направленные на ограничение действия высокотемпературного пара теплоносителя, конденсаторы-теплообменники. Одним из активных систем борьбы с возникновением стагнации является применение защитных жалюзи, устанавливаемых на коллектор. Применение полноценного комплекса защиты от негативного влияния режима стагнации будет сохранять оборудование коллекторной системы и продлевать срок службы гликолевого теплоносителя, температурное воздействие на который приводит к его деградации.

**Ключевые слова:** солнечная водяная система, солнечный коллектор, теплоноситель, стагнация, теплоноситель.

**Anastasia P. Polozkova, Artem S. Gusarov**

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

## RESEARCH OF OPERATING MODES OF WATER SOLAR COLLECTORS AND INCREASING THE EFFICIENCY OF THEIR OPERATION WHEN STAGNATION OCCURS

**Abstract.** The purpose of the study is to identify technical problems in the operation of solar equipment that hinder the widespread implementation of systems. The problems with overheating of the coolant in water solar collector

*systems – a special mode in the operation of the equipment called stagnation – are considered. The stages of stagnation mode development are presented and the influence of each stage on the parameters of water solar collector systems is analyzed. It is revealed that the stagnation mode negatively affects the components of water solar collector systems, reduces the service life or damages them. The main negative factor is the high temperature of the generated vapor in the collector when the system overheats. After conducting the experiments, it was concluded (which is consistent with research in this field) that the liquid coolant remaining in the collector with insufficient emptying of the system will form high-temperature steam, damaging the components. The main method to reduce the effect of high temperature on components is to completely empty the collector system in a timely manner. Technical solutions for improved emptying of such systems are proposed, as well as technical solutions aimed at limiting the effect of high-temperature coolant vapor, heat exchanger condensers. One of the active anti-stagnation systems is the use of protective blinds installed on the collector. Application of a full-fledged complex of protection against negative influence of stagnation mode will save the collector system equipment and prolong the service life of glycol coolant, temperature impact on which leads to its degradation.*

**Keywords:** solar water system, solar collector, coolant, stagnation, heat carrier.

В летние месяцы с повышением температуры окружающей среды и снижением потребности помещений в постоянном отоплении и повышенном использовании горячего водоснабжения системы с солнечными водяными коллекторами могут производить избыточную тепловую энергию. На избыток выработки тепла могут повлиять также высокая инсоляция и площадь коллекторов. Избыточно выработанное тепло ведет к повышению температуры теплоносителя, если не осуществляется своевременный его отвод в бак-аккумулятор. В баках-аккумуляторах, подключенных к системам с солнечными коллекторами, теплообмен замедляется с повышением температуры воды обратного трубопровода системы отопления, возникает режим, называемый стагнацией. Теплоноситель, циркулирующий по коллекторам, начинает перегреваться [1].

Поэтому проблема защиты компонентов системы (расширительных баков, насосов, уплотнителей, полипропиленовых трубопроводов) от высоких температур является важной, особенно для обеспечения бесперебойной работы оборудования в долгосрочной перспективе и минимизации затрат на его обслуживание.

В летний период в коллекторных системах отопления помещений часто возникают стагнационные явления, поскольку в ясный день температура в баке-аккумуляторе легко достигает максимального значения (95 °С). В этом случае контроллер отключает насос коллекторного контура. Затем температура коллектора быстро повышается и достигает так называемой температуры стагнации, которая составляет от 180 до 210 °С для плоских коллекторов с селективным покрытием и от 220 до 300 °С для вакуумных трубчатых коллекторов. В зимний период это может наблюдаться в солнечный день, когда температура в коллекторе резко повышается, а насос циркуляции не успевает включиться, теплоноситель начинает испаряться [2].

К известным проблемам, связанным со стагнационным режимом, относятся такие:

высокотемпературное воздействие на части коллекторного контура, включая участки системы в помещении, в результате такого воздействия возможны сбои в работе компонентов системы и утечки в системе;

открытие предохранительного клапана коллекторного контура, даже если при проектировании были соблюдены требования к объему расширительного бака и величине давления в системе;

гидравлический (конденсационный) удар, при котором возникает резкое повышение давления в коллекторном контуре и во вторичных контурах при полной конденсации паров теплоносителя.

Последовательность событий во время стагнации можно разделить на пять различных этапов, которые можно рассмотреть на основе упрощенной модели одного коллектора [4, 9].

Этап 1 – перегрев теплоносителя, который находится в жидком состоянии (далее – жидкости). Температура в коллекторе повышается до тех пор, пока не начнется процесс

испарения теплоносителя в верхней части коллектора. Увеличение давления в системе при этом режиме незначительно.

Этап 2 – вытеснение жидкости из коллектора. Большое количество жидкости вытесняется в расширительный бак за счет образования паровой фазы из-за испарения теплоносителя в коллекторе (далее – пара). В результате давление в системе быстро повышается. Температура жидкости также быстро достигает точки кипения на тех участках труб, которые заполняются паром. Теплоноситель, температура которого находится близко к его температуре кипения, циркулируя от коллектора далее по системе, создает высокую термическую нагрузку на остальные компоненты системы. Этот этап длится всего несколько минут и заканчивается, когда пар заполняет коллектор. Жидкость, которая не может быть вытеснена давлением пара, остается в коллекторе, количество оставшейся жидкости обусловлено конструкцией коллекторной системы.

Этап 3 – опорожнение коллектора путем выкипания теплоносителя. Остаточная жидкость в коллекторе испаряется. Тепловая энергия передается другим компонентам системы только через вытесненный из коллектора пар. Вытесненный из коллектора в паровой фазе теплоноситель может конденсироваться в трубопроводах других участков системы. Обычно давление в коллекторных системах составляет от 0,15 до 0,35 МПа, соответственно температура кипения теплоносителя будет от 130 до 155 °С. В конце третьего этапа объем пара и давление в системе достигают максимальных значений.

Этап 4 – заполнение коллектора перегретым паром. Пар в коллекторе становится перегретым. Фаза перегрева может длиться несколько часов в безоблачные дни и заканчивается, когда солнечное излучение идет на спад.

Этап 5 – заполнение коллектора. Коллектор начинает заполняться, когда температура в коллекторе опускается ниже температуры кипения и начинается конденсация, это происходит в результате спада солнечного излучения.

При этом возникают нежелательные режимы работы системы. Горячая жидкость, вытесняемая из коллектора в ходе этапа 2, может создавать критическую температурную нагрузку на другие компоненты системы помимо самого коллектора, который обычно выполнен из медных трубок и выдерживает высокие температуры. Также наиболее негативным режимом является перенос тепла насыщенным паром, образующимся в коллекторе и конденсирующимся во всех «холодных» точках контура системы.

Ход этапов 2 и 3 определяет максимальные температуры в системе. Жидкость, оставшаяся в конце этапа 2, определяет продолжительность этапа 3. Процесс испарения оставшейся жидкости в коллекторе будет поддерживать температуру коллектора, соответствующую температуре кипения используемого теплоносителя. Чем больше жидкости осталось в коллекторе, тем больше пара будет образовываться в конце этапа 3. Пар из насыщенного состояния переходит в перегретый после завершения испарения остаточной жидкости и заполняет коллектор полностью, и весь коллектор достигает максимальной температуры стагнации. Пар находится в стационарном состоянии и больше не передает энергию остальным частям системы (примерно в середине этапа 4).

В исследовании [3] выявлено, что действительные температурные нагрузки в системах с солнечными коллекторами в случае возникновения стагнации могут быть выше рабочих температур компонентов системы, что даже привело к повреждению мембраны в расширительном баке. Если температура на входе в бак-аккумулятор составляет более 105 °С, это может привести к сокращению срока службы полипропиленовых трубопроводов, у которых максимальная рабочая температура составляет 90 °С [ГОСТ 32415–2013]. Нестабильная работа коллекторной системы и выход из строя ее компонентов подтверждаются исследованием рынка в рамках проекта «Мировая инициатива по преобразованию и укреплению рынка солнечных водонагревателей», управляемого программой развития ООН и проведенными опросами пользователей солнечных коллекторов,

которые отмечают эти проблемы как основные при эксплуатации: 14 % всех пользователей жилых помещений и 8 % пользователей коммерческого сектора [4].

Чем быстрее по времени и полностью будет опорожнен коллектор, тем меньше по величине будет температурное воздействие на компоненты системы, меньше компонентов подвергнется воздействию повышенной температуры и снизится длительность такого воздействия [3]. В работе [5] был предложен алгоритм, с помощью которого можно сигнализировать о начале стагнации, установив соответствующие датчики в систему, но недостаточно вовремя отключить насос, важно полностью удалить теплоноситель, особенно если система находится под давлением, для этого можно использовать систему с вытеснением теплоносителя инертным газом, с последующим сбросом его в атмосферу, когда температура коллектора возвращается в рабочий диапазон [6]. Следовательно, коллекторы и трубы, соединяющие их, должны обладать хорошей опорожняемостью, чтобы избежать проблем с возникновением стагнации. Системы с хорошим опорожнением минимизируют количество остаточной жидкости и, таким образом, сокращают период времени и область воздействия критического третьего этапа стагнации.

Схемы коллекторов с недостаточным и эффективным опорожнением показаны на рисунке 1.

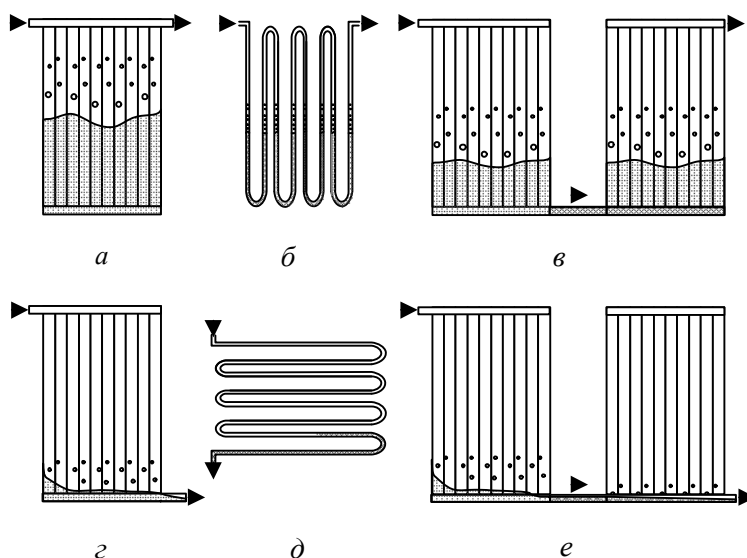


Рисунок 1 – Схемы солнечных коллекторов с различным присоединением патрубков подачи и отвода теплоносителя: схемы с недостаточным опорожнением от теплоносителя (а – в); схемы с эффективным опорожнением от теплоносителя (г – е)

Схемы типа а – в, в которых присутствует соединение обратной и подающей линий в верхней части коллектора не приводят к эффективному опорожнению, как в случае с коридорным расположением трубок (а), так и в случае со змеевиковым (б). Важно также учитывать соединение нескольких коллекторов (в). Кроме того, повышается вероятность возникновения гидравлических конденсационных ударов [5]. Теплоноситель в схемах г – е будет эффективно удаляться из коллектора во всех случаях, если не нарушен уклон коллектора. При такой схеме жидкость вытесняется из коллектора на этапе 2. Следовательно, продолжительность критического третьего этапа стагнации уменьшится, и пар не распространится на компоненты системы.

Влияние соединения нескольких коллекторов на опорожнение рассмотрено в статье [7], где указано, что недопустимо создавать U-образные конструкции из присоединительных труб между коллекторами, так как в них также может оставаться жидкость, которая повлияет на увеличение третьего этапа стагнации и конденсационных ударов, что также может повредить соединительные трубки.

Таким образом, эффективное опорожнение коллекторной системы напрямую влияет на стабильность работы системы и срок службы ее компонентов. Тем не менее не на всех системах удастся добиться эффективного опорожнения в случаях, когда коллекторная система уже смонтирована неверно или когда геометрия здания и (или) расположение коллекторов не позволяют ее правильно спроектировать. Поэтому предлагаются технические решения, которые позволяют отчасти решить проблему при критических режимах стагнации. Основными негативными факторами, которые термически повреждают компоненты системы, являются разогретый насыщенный, вытесненный из коллектора пар, возникающий при интенсивном испарении жидкой фазы теплоносителя внутри коллектора, и теплоноситель в жидкой фазе при температурах, близких к кипению, следовательно, технические решения должны предотвращать их влияние.

Существуют два вида технических решений – активные и пассивные. Использование активных систем, снижающих стагнационные факторы, связано с дополнительными затратами на привод насосов циркуляции или электроэнергию, используемую для работы холодильных машин и тепловых насосов. Пассивные системы просты в использовании, не требуют дополнительной энергии, промежуточных теплоносителей и могут быть смонтированы без больших финансовых затрат в коллекторную систему. В работе «Стратегии предотвращения недопустимых температурных нагрузок на компоненты системы в случае стагнации» Кристиана Финка и Роберта Хауснера [7] предложены три стратегии предотвращения стагнации: ночное охлаждение; воздухоохладитель; активный отвод тепловой энергии, переносимой вместе с паром, с помощью встроенного радиатора или использование внешнего теплообменника и вторичного циркуляционного контура с насосом.

На экспериментальной установке, где проводились исследования режимов коллекторной системы, установлен активный охладитель в виде воздушного теплового насоса. Но его работы оказалось недостаточно, также он не работает в момент отключения циркуляции. Образовывались значительные потери теплоносителя при интенсивном его вскипании в момент запуска системы. Насыщенный пар и часть жидкости сбрасывались через клапан сброса давления в верхней части системы, что привело к потере большей части теплоносителя, циркулирующего в коллекторе. Предлагаемое решение, с учетом рекомендаций работы Кристиана Финка и Роберта Хауснера, – это установка пассивного охладителя.

Радиатор-охладитель, установленный в систему, который будет срабатывать в случае стагнации, показан на рисунке 2.

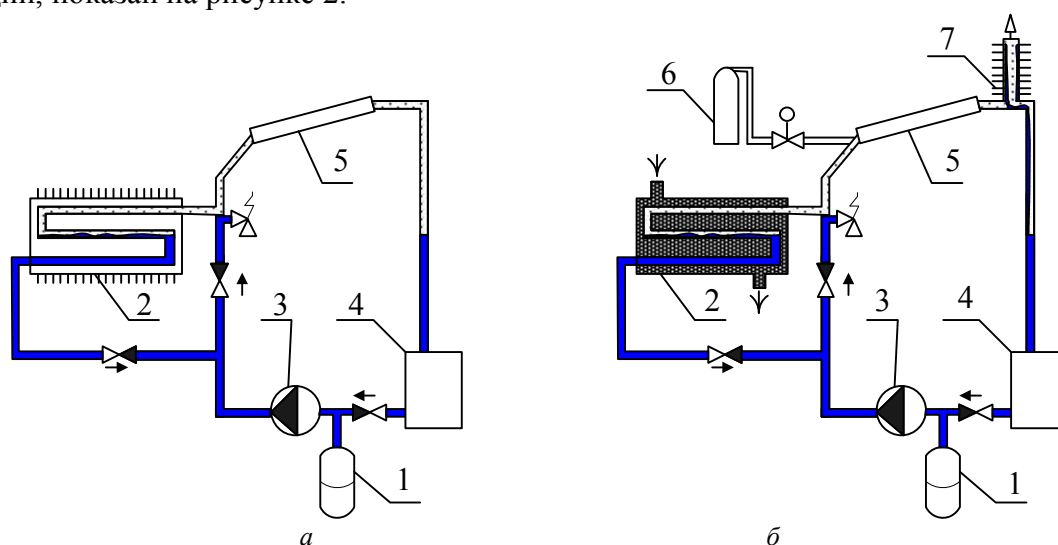


Рисунок 2 – Пассивные технические решения для решения проблем негативных режимов стагнации:  
 1 – расширительный бак; 2 – охладитель; 3 – насос циркуляции теплоносителя; 4 – бак-аккумулятор;  
 5 – коллектор; 6 – бак с инертным газом для продувки коллектора; 7 – пассивный конденсатор-расширитель пара: схема с радиатором-охладителем, предложенная в работе [4], (а) и доработанная схема с водяным охладителем пара и с конденсатором (б)

Конструктивно радиатор выполнен в виде медной трубки с алюминиевыми ребрами или сделанный аналогичным образом. Например, может быть использована медная трубка 20 мм (толщина стенки 2 мм), которая выдерживает температуру более 200 °С, с установленными ребрами из медных листов  $80 \times 80 \times 0,5$  мм, расположенных на расстоянии 5 мм – такая конструкция может рассеивать удельный тепловой поток более 800 Вт/м в зависимости от температуры теплоносителя.

Измерения максимального удельного теплового потока, передаваемого паром, который выходит из коллектора в конце этапа 3, позволили количественно оценить различия в опорожнении коллекторов разных типов [6]: у коллекторов, которые показаны на рисунке 1, *г – е* (с эффективным опорожнением), удельный тепловой поток пара составляет 50 Вт/м<sup>2</sup> площади коллектора. У коллекторов, изображенных на рисунке 1, *а – в* (с недостаточным опорожнением), удельный тепловой поток пара достигает 120 Вт/м<sup>2</sup> площади коллектора. Если принять, что линейный тепловой поток трубопроводов коллекторной системы при температуре насыщенного пара составляет около 25 Вт/м, то в небольших установках, использующих коллекторы с эффективным опорожнением, пар проникает в систему не более чем на несколько метров и, таким образом, не представляет проблемы с перегревом компонентов. С другой стороны, стандартная система из двух коллекторов с недостаточным опорожнением общей площадью 6 м<sup>2</sup> при возникновении стагнации приведет к значительному образованию пара и далекого проникновения его по системе трубопроводов. Это может повредить термически чувствительные компоненты, так как для отвода тепловой энергии в окружающую среду потребуется не менее 20 м труб. Следовательно, в таких системах необходимо использование радиатора-охладителя (см. рисунок 2). Конструкция, шаг оребрения, материал радиатора-охладителя могут быть изменены в соответствии с применяемой коллекторной системой и рассчитаны по известным формулам теплообмена и теплопроводности [8].

Тем не менее радиатор-охладитель, расположенный на подающей линии, не решает проблему вытеснения жидкости и насыщенного пара из коллектора при быстром перегреве коллектора. Предлагаемое решение – перенести клапан сброса давления или воздухоотводчик выше и установить его на встроенный конденсатор из медной трубки в верхней точке коллектора. Такой конденсатор играет роль расширителя для пара, образующегося в коллекторе. В предложенной схеме применен более эффективный водяной теплообменник, а не воздушный, и используется система дополнительной продувки от теплоносителя с инертным газом. Такой вид схемы предполагает использование небольшого количества активных устройств и применения автоматики или ручного управления клапаном продувки, при этом циркуляция воды через теплообменник-охладитель должна осуществляться дополнительным насосом. Еще одно решение проблемы стагнации – применение жалюзи, покрытых отражающим материалом (рисунок 3), которое может работать автоматически и управляться вручную.

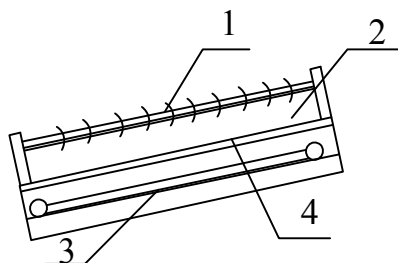


Рисунок 3 – Схема применения жалюзи для коллектора: 1 – жалюзи; 2 – воздушный зазор; 3 – трубки коллектора; 4 – остекление коллектора

Данное решение может быть управляемо по температурному датчику с воздействием на электропривод механизма закрытия шторок. Отражающий материал не даст перегреваться конструкции, а воздушный зазор будет служить дополнительной защитой для остекления и коллектора, даже если металлические жалюзи перегреются. Это решение может быть использовано и для предотвращения повреждения коллектора градом или засыпания снегом. Автоматическое закрытие жалюзи может быть эффек-

тивной защитой от аварии насоса или отключения электричества, если реализовать применение электромагнита для управления шторками.

Использование такого комплекса пассивных и активных устройств, предложенных в данном исследовании, полностью решило бы проблему с перегревом компонентов экспериментальной коллекторной системы и потерей дорогостоящего и токсичного теплоносителя, а также необходимости постоянного обслуживания системы, было бы сэкономлено электричество на привод активного охладителя, который ни разу не включался в системе за контролируемый период в эксперименте.

Данные технические решения не защищают сам теплоноситель от высоких температур. Гликолевый компонент в теплоносителе и ингибирующие добавки становятся нестабильными при высоких температурах и могут разрушаться – будет возникать флокуляция и выпадение твердых осадков. При нормальном функционировании системы теплоноситель не испытывает существенной нагрузки. Следует избегать длительных высоких температур, которые могут возникнуть в режиме стагнации, чтобы предотвратить преждевременную деградацию теплоносителя [9]. Коллекторы с эффективным опорожнением в значительной степени соответствуют этому требованию, хотя температура теплоносителя и в них может достигать высоких значений (до 155 °С), но при эффективном опорожнении коллектора температурное воздействие на теплоноситель кратковременное и подвергается ему малая доля от всего объема теплоносителя, циркулирующего по системе.

При недостаточном опорожнении остатки жидкости, находящиеся в разогретом коллекторе, могут подвергаться воздействию высокой температуры при его кипении в течение длительного периода времени. При длительном кипении испаряется водная часть смеси теплоносителя и соответственно увеличивается концентрация компонентов гликоля и ингибитора в остаточной жидкой части. Увеличение концентрации этих компонентов приводит к локальному повышению температуры кипения (температура кипения гликоля выше, чем у воды), таким образом, процесс увеличивается по времени и продолжается до тех пор, пока концентрированная остаточная жидкость не испарится полностью или не снизится температура коллектора. Это приводит к чрезвычайно длительному высокотемпературному воздействию на концентрированный теплоноситель с его значительной и быстрой деградацией (для чистого гликоля температура кипения превышает 210 °С при давлении, соответствующем условиям стагнации) [10]. Как показано в исследовании, проведенном в лаборатории [3], теплоноситель приобретает темный оттенок.

На основании изложенного можно сделать выводы:

на критические температурные режимы компонентов коллекторной системы при возникновении стагнации влияет эффективность опорожнения коллекторов, что согласуется с исследованием, приведенным в источнике [11];

существуют эффективные способы решения проблем с критическими режимами стагнации – это пассивные радиаторы-охладители, устанавливаемые в коллекторную систему, а также активные системы, рассмотренные в настоящем исследовании, такие как система заполнения инертным газом, дополнительные теплообменники и жалюзи.

## Список литературы

1. Германович, В. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2011. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. Хамоков, М. М. Определение КПД солнечных коллекторов, применяемых в регионах с малой солнечной радиацией / М. М. Хамоков, А. Б. Чапаев. – Текст : непосредственный // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2020. – № 6 (81). – С. 33–39. – DOI 10.37493/2307-907X.2020.6.4. – EDN UQPOIW.
3. Fink, C., & Hausner, R. (2000, November). Strategien zur Vermeidung von unzulässigen Temperaturbelastungen an Anlagenkomponenten im Stagnationsfall. In *conference 'Materialien und Komponenten in Solaranlagen'*, Salzburg.

4. Hausner, R., & Fink, C. (2000). Stagnation behaviour of thermal solar systems. *EUROSUN, Copenhagen, Denmark*.
5. Финиченко, А. Ю. К вопросу управления системой теплоснабжения здания с солнечным коллектором с целью энергосбережения / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 6 (146). – С. 30–34. – EDN LQIMNP.
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 государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 505–510. – EDN RXEFOP.
7. Hausner, R., Fink, C., Wagner, W., Riva, R., & Hillerns, F. (2003). Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten. *Berichte aus Energie-und Umweltforschung*, 9, 2003.
8. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Бастет, 2010. – 344 с. – Текст : непосредственный. – EDN QMKZMJ.
9. Финиченко, А. Ю. Исследование работы гидравлической системы солнечного коллектора с обратным дренажем / А. Ю. Финиченко, А. П. Полозкова, А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 82–90. – EDN PGVTAK.
10. Рашидов, Ю. Расчет гидравлического удара в самодренируемых гелиоустановках / Ю. Рашидов, З. Файзиев, К. Рашидов. – Текст : непосредственный // Общество и инновации. – 2020. – № 1 (1/s). – С. 16–29.
11. Berner, J. (2008). Drainback systems empty and safe. *Sun and Wind Energy*, no. 5, pp. 48-53.

### References

1. Germanovich V., Turilin A. *Al'ternativnye istochniki energii. Prakticheskie konstruksii po ispol'zovaniuu energii vetra, solntsa, vody, zemli, biomassy* [Alternative energy sources. Practical designs for the use of wind, solar, water, land, biomass energy]. Saint-Petersburg, Science and Technology Publ., 2011, 320 p. (In Russian).
2. Hamokov M., Chapaev A. Determination of the efficiency of solar collectors applied in regions with low solar radiation. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta – Newsletter of North-Caucasus Federal University*, 2020, no. 6 (81), pp. 33-39. DOI 10.37493/2307-907X.2020.6.4. EDN UQPOIW. (In Russian).
3. Fink, C., & Hausner, R. (2000, November). Strategien zur Vermeidung von unzulässigen Temperaturbelastungen an Anlagenkomponenten im Stagnationsfall. In *conference 'Materialien und Komponenten in Solaranlagen'*, Salzburg.
4. Hausner, R., & Fink, C. (2000). Stagnation behaviour of thermal solar systems. *EUROSUN, Copenhagen, Denmark*.
5. 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. *Ėnergobereženie i vodopodgotovka – Energy saving and water treatment*, 2023, no. 6 (146), pp. 30-34. EDN LQIMNP. (In Russian).
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. EDN RXEFOP. (In Russian).
7. Hausner, R., Fink, C., Wagner, W., Riva, R., & Hillerns, F. (2003). Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten. *Berichte aus Energie-und Umweltforschung*, 9, 2003.

8. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Bastet Publ., 2010, 344 p. EDN QMKZMJ. (In Russian).
9. 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. EDN PGVTAK. (In Russian).
10. Rashidov Yu., Fayziev Z., Rashidov K. Calculation of hydraulic shock in self-drainable helio-installations. *Obshchestvo i innovatsii – Society and innovations*, 2020, no. 1 (1/s), pp. 16-29. (In Russian).
11. Berner, J. (2008). Drainback systems empty and safe. *Sun and Wind Energy*, no. 5, pp. 48-53.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Полозкова Анастасия Петровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студентка кафедры «Теплоэнергетика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

### 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. Исследование режимов работы водяных солнечных коллекторов и повышение эффективности их работы при возникновении стагнации / А. П. Полозкова, А. С. Гусаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 104 – 112.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Polozkova Anastasia Petrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Student of the department «Thermal power engineering», OSTU.

Phone: +7 (983) 660-07-63.

E-mail: nastyapolozkova6@gmail.com

### 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., Gusarov A.S. Research of operating modes of water solar collectors and increasing the efficiency of their operation when stagnation occurs. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 104-112. (In Russian).

УДК 621.311.4

**Т. В. Мятеж, С. С. Донченко, В. А. Капустин**

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НОВОСИБИРСКОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КАМЕНСКОЙ ПОЙМЫ

**Аннотация.** Целью данной статьи является исследование влияния режима природного аккумулятора энергии (речных пойм) по забору/отдаче воды на процесс управления режимами работы гидроэлектростанции. В статье рассмотрено воздействие водного ресурса поймы реки Оби на режимы работы Новосибирской ГЭС в составе гидротепловой системы на основе применения разработанной авторами оптимизационной методикой с учетом стоимости гидроресурса на ГЭС. При этом в качестве критерия принят критерий максимизации прибыли энергетического объекта. В основу модели положена теория предельной полезности в сочетании с оптимизационными методиками. Данная оптимизационная модель позволяет решить ряд экономических и экологических проблем в составе водохозяйственного комплекса (ВХК) по управлению емкостью водохранилища ГЭС, на ее основании были получены оптимальные вырабатываемые мощности для Новосибирской ГЭС по предоставленным данным, используемым в расчетах. Для получения прогнозов по влиянию Каменской поймы на

вырабатываемые мощности Новосибирской гидроэлектростанции были использованы обучаемые нейронные сети программных пакетов Matlab и Pandas PYTHON. По полученным прогнозным значениям определялось влияние Каменской поймы (поймы реки Оби) с помощью рассматриваемой методики. Таким образом, результатом настоящего исследования является оптимизация режимов работы Новосибирской гидроэлектростанции при условии учета влияния Каменской поймы и без учета влияния Каменской поймы, определение стоимости гидроресурса и оптимальной вырабатываемой мощности на ГЭС в условиях маловодного 2012 года. Более того, выполненные расчеты позволяют сделать вывод о существенном вкладе такого природного аккумулятора воды (энергии), как Каменская пойма, в энергоотдачу гидроэлектростанций. Поэтому изучение поведения указанных систем заслуживает отдельного рассмотрения при оптимизации режимов работы энергосистем смешанного типа.

**Ключевые слова:** ГЭС, синергетическая стоимость гидроресурса, оптимизация функционирования гидроэлектростанций, водохозяйственный комплекс, предельная полезность, цена воды для гидроэлектростанций.

**Tatiana V. Myatezh, Semyon S. Donchenko, Vladimir A. Kapustin**

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

## OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE NOVOSIBIRSK HYDROELECTRIC POWER PLANT WITH CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF THE KAMENSKAYA FLOODLINE

**Abstract.** The objective of this article is to study the influence of the natural energy accumulator (river floodplains) mode on water intake/output on the process of controlling the operating modes of a hydroelectric power station. The article considers the impact of the water resource of the Ob River floodplain on the operating modes of the Novosibirsk hydroelectric power station as part of a hydrothermal system based on the application of the optimization technique developed by the authors, taking into account the cost of the hydro resource at the hydroelectric power station. In this case, the criterion of maximizing the profit of the energy facility is adopted as a criterion. The model is based on the theory of marginal utility in combination with optimization techniques. This optimization model allows solving a number of economic and environmental problems as part of the water management complex (WMC) for managing the capacity of the hydroelectric power station reservoir; on its basis, optimal generated capacities for the Novosibirsk hydroelectric power station were obtained based on the provided data used in the calculations. To obtain forecasts for the influence of the Kamenskaya floodplain on the generated capacities of the Novosibirsk hydroelectric power station, trained neural networks of the Matlab and Pandas PYTHON software packages were used. The obtained forecast values were used to determine the influence of the Kamenskaya floodplain (the Ob River floodplain) using the method under consideration. Thus, the result of the current study is the optimization of the operating modes of the Novosibirsk hydrothermal system, taking into account the influence of the Kamenskaya floodplain and without taking into account the influence of the Kamenskaya floodplain, determining the cost of the hydro resource and the optimal generated power at the hydroelectric power station under the conditions of the low-water year of 2012. Moreover, the calculations performed allow us to conclude that such a natural water (energy) accumulator as the Kamenskaya floodplain makes a significant contribution to the energy output of hydrothermal power systems. Therefore, the study of their behavior deserves separate consideration when optimizing the operating modes of mixed-type power systems.

**Keywords:** hydroelectric power station, synergetic cost of hydro resources, optimization of the functioning of hydroelectric power plants, marginal utility, water management complex, marginal utility, price of water for hydroelectric power plants.

В данной работе рассматривается метод максимизации прибыли [1 – 4], который сочетает в себе оптимизационный метод и критерий предельной полезности. Рассмотренный в работе метод должен заменить более сложные расчеты на простые при переходе от  $b$  к  $q$  без использования коэффициента неопределенных множителей Лагранжа.

Актуальные проблемы разработки и практического применения оптимизационных методов в управлении региональными водно-энергетическими комплексами исследованы в научных трудах Анопченко Т. Ю., Гофмана К. Г., Золотарёва В. С., Карпендера Р., Горнштейна В. М., Филиппова Т. А., Сидоркина Ю. М., Русина А. Г., Синькова В. М., Богословского А. В. [5 – 7].

Аналогом предлагаемой методики является известный в настоящее время способ оптимального распределения нагрузки энергосистемы между гидроэлектростанциями (ГЭС) и тепловыми электрическими станциями (ТЭС) на основе равенства дифференциальных характеристик расхода топлива на тепловых электростанциях и расхода воды на

гидравлических. Такие характеристики еще в СССР получили названия характеристик относительных приростов (ХОП).

В общем виде решение критериального уравнения при оптимальном распределении нагрузки в электроэнергетических системах (ЭЭС) без учета технических ограничений, накладываемых на него, имеет вид:

$$\frac{b_s}{1-\sigma_s} = \lambda_2 \cdot \frac{q_1}{1-\sigma_1} = \dots = \lambda_2 \cdot \frac{q_m}{1-\sigma_m} = idem, \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – относительные приросты расходов топлива на тепловых станциях, число которых в ЭЭС в общем случае равно  $n$ ;

$q$  – относительный прирост расхода воды на гидростанции;

$\lambda$  – переводной коэффициент, суть которого будет раскрыта ниже;

$\frac{\partial \Delta P}{\partial N_i} = \sigma_i$  – относительный прирост потерь активной мощности от протекания в сети мощности  $i$ -й станции.

При этом учитывается, что ГЭС является одиночной (т. е. работает не в каскаде ГЭС) и ведет годовое (сезонное) регулирование. При этом напор в течение суток за редким исключением остается величиной неизменной, т. е.  $H \approx \text{const}$ . Допущение о постоянстве напора ГЭС существенно упрощает алгоритм решения задачи. При этом  $1 \text{ м}^3$  водных ресурсов для всего периода оптимизации будет иметь практически одинаковую энергию, что является недостатком предложенного метода равенства относительного прироста расхода топлива.

Дифференциальные расходные характеристики ГЭС и ТЭС имеют различную размерность, поэтому коэффициент  $\lambda$  в выражении (1) выполняет роль переводного множителя и называется мерой эффективного использования гидроресурсов в ЭЭС. На практике приходится опытным путем подбирать значение коэффициента  $\lambda$  с учетом также и ограниченности гидроресурса на ГЭС. При этом количество итераций может составлять пять и более, что требует больших затрат машинного времени, означает длительную сходимость методики и является ее явным минусом. В международной практике для наивыгоднейшего распределения нагрузки между генерирующими объектами используется метод динамического программирования. Существенным недостатком этого метода является то, что его точность зависит от величины шага квантования, т. е. чем он меньше, тем выше точность расчетов, а для ценообразования применяют принцип маржинального ценообразования, что, по-нашему мнению, не является эффективным средством, поскольку цена при этом складывается исходя из затрат замыкающего наименее выгодного производителя и оказывается довольно высокой [8, 9].

Таким образом, как показывает патентно-ориентированный поиск, не существует единой универсальной методики по определению стоимости гидроресурса и для ГЭС как инфраструктурных объектов, и для ВХК. В основном повсеместно используется налог на воду с той лишь разницей, что за рубежом он существенно выше российских значений.

В инструментарий разработанной модели входит сочетание оптимизационного метода множителей Лагранжа и теории предельной полезности. По результатам исследования мы получаем новое правило перехода от относительного прироста расхода воды к относительному приросту расхода топлива: значение относительного прироста расхода воды на ГЭС  $q'$ , лежащее на кривой безразличия, будет равно соответствующему значению относительного прироста расхода топлива на ТЭС  $b'$ , лежащему на той же кривой. Это является явным преимуществом методики по сравнению с существующими аналогами при решении оптимизационных задач для смешанных энергосистем, состоящих из ГЭС и ТЭС, поскольку позволяет существенно сократить машинное время (требуется всего одно действие вместо пяти итераций) на решение не только поставленной задачи оперативного регулирования, но и оптимизационной задачи с целью обеспечения конкурентоспособности генерирующей компании на рынке. Еще одним немаловажным преимуществом разработанной методики по сравнению с российскими и зарубежными аналогами является учет изменчивости напора в течение суток, что лучше позволяет учитывать технологические особенности функционирования ГЭС в отличие от ранее использованных методик.

Предлагаемый подход основывается прежде всего на корректном представлении дифференциальных характеристик. Действительно, данные характеристики должны быть производными не от расходов энергоресурсов, а от затрат (издержек), связанных с их использованием. Разработанная методика является актуальной и может быть применена не только для российских условий, но и предложена для широкого международного использования. Более того, авторами предложена математическая модель для ее реализации и проведения оптимизации режимов работы ГЭС и всего ВХК на основе определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС.

Целью исследования является изучение влияния природного аккумулятора поймы реки Оби (от села Фоминское до г. Камень-на-Оби) на режим функционирования Новосибирской ГЭС и оптимизация режимов работы данной ГЭС с учетом влияния режима забора/отдачи гидроресурса поймой на основании критерия максимизации прибыли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработка методики оптимизации режимов работы ГЭС в современных условиях с учетом режима природного аккумулятора (речной поймы); исследование и анализ поведения поймы р. Оби как природного аккумулятора энергии гидроресурса; анализ возможностей нейросетевых технологий на примере программных пакетов Matlab и Pandas Python для прогнозирования расхода воды на Новосибирской ГЭС (НГЭС) с учетом влияния воздействия на режим ее энергоотдачи со стороны поймы; оптимизация режимов работы НГЭС без учета влияния поймы; сравнительный анализ оптимальных режимов работы НГЭС с учетом и без учета влияния поведения речной поймы; разработка рекомендаций для управления функционированием НГЭС в составе гидротепловой энергосистемы.

В настоящей работе оптимизация режимов работы НГЭС по распределению электрической нагрузки наиболее выгодным образом решается на основании критерия максимизации прибыли согласно теории предельной полезности.

**Методика оптимизации гидротепловых систем по методу максимизации прибыли с критерием предельной полезности.** Для оптимизации режимов НГЭС используемый критерий максимизации прибыли [10 – 12] предназначен для того, чтобы производитель электроэнергии увеличивал прибыль от продажи электроэнергии. Производимая электроэнергия будет определена точкой, в которой предельный доход равен предельным издержкам ( $MR = MC$ ). По данному критерию оптимизации решается задача по наиболее выгодному распределению электрической энергии в составе смешанной энергосистемы (рисунок 1).

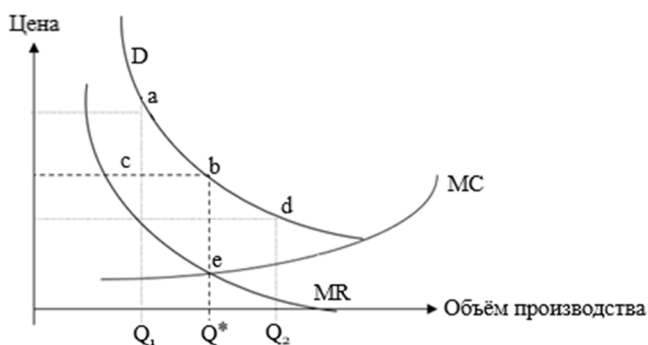


Рисунок 1 – График максимизации прибыли производимой электроэнергии

Для выполнения критерия оптимизации определяется стоимость гидроресурса с точки зрения выполнения его функции в рамках смешанной энергосистемы по выработке электроэнергии. Цена воды в настоящее время учитывается лишь налогом на нее (10 – 15 % для России) [13].

Расчет по издержкам представлен следующими формулами:

$$U_b = c_b \cdot b; \quad (2)$$

$$U_q = c_{\text{воды}} \cdot q, \quad (3)$$

где  $U_b$  – предельные издержки по топливу на эквивалентной ТЭС;

$U_q$  – предельные издержки по воде на ГЭС;

$c_b$  – цена на топливо, цена воды;

$c_{\text{воды}}$  – цена на топливо, цена воды;

$b$  и  $q$  – характеристики относительного прироста расхода топлива и воды на ТЭС и ГЭС соответственно.

Задача по оптимизации решается в рамках каждого месяца, однако решение связано с долгосрочным (в течение года с детальным учетом сезонных режимов) режимом работы ЭЭС, так как существует ограниченность энергоресурса ГЭС. В течение суток напор на ГЭС принимается неизменным, так как в течение суток он изменяется незначительно.

Учитывая сказанное выше, составим условия – формулы по оптимальному распределению нагрузки в смешанной энергосистеме:

$$b^* = q^* = \text{idem}; \quad (4)$$

$$H = \text{const}; \quad (5)$$

$$N_{\text{н}} = N_{\text{ТЭС}} + N_{\text{ГЭС}}; \quad (6)$$

$$N_{\text{ТЭС min}} \leq N_{\text{ТЭС}} \leq N_{\text{ТЭС max}}; \quad (7)$$

$$N_{\text{ГЭС min}} \leq N_{\text{ГЭС}} \leq N_{\text{ГЭС max}}; \quad (8)$$

$$N_{\text{набл}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_c \cdot \sin \alpha_0 \cdot L}; \quad (9)$$

где  $N_{\text{набл}}$ ,  $N_{\text{н}}$ ,  $N_{\text{ТЭС}}$ ,  $N_{\text{ГЭС}}$ , – наблюдаемое значение мощности, нагрузка энергосистемы, мощности покрытия нагрузки эквивалентной ТЭС и ГЭС соответственно;

$N_{\text{ТЭС min}}$ ,  $N_{\text{ТЭС max}}$ ,  $N_{\text{ГЭС min}}$ ,  $N_{\text{ГЭС max}}$  – минимальная и максимальная мощности эквивалентной тепловой и гидравлической станций соответственно.

$U_1$  – модуль напряжения в начале линии;

$U_2$  – модуль напряжения в конце линии;

$Z_c$  – волновое сопротивление линии;

$\alpha_{0L}$  – волновая длина линии.

Потерями электроэнергии в сетях пренебрегаем. В данной работе потери в сетях не рассматриваются, поскольку все станции находятся на территории Новосибирской области.

Расчеты по оптимизации распределения нагрузки в гидротепловой системе по указанным выше условиям упрощают решение оптимизационной задачи.

Таким образом, НГЭС после оптимизации может работать в более выгодном для системы режиме. По производимым расчетам становятся известными тарифная стоимость гидроресурса и цена продаж вырабатываемой мощности на ГЭС.

Воспользуемся кривой безразличия при расчете оптимизационных задач в смешанной энергосистеме. Согласно правилам построения кривой безразличия берутся величины, обратные относительноному приросту топлива ( $b$ ) и относительноному приросту воды ( $q$ ), т. е.  $1/b$  и  $1/q$ . Для ГЭС будем откладывать по оси абсцисс, для эквивалентной ТЭС по оси ординат. Проведем кривую безразличия, соединяя две точки, – получаем диаграмму кривой безразличия (рисунок 2).

По условию, указанному выше, составим уравнение равенства двух величин:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{q}; \quad (10)$$

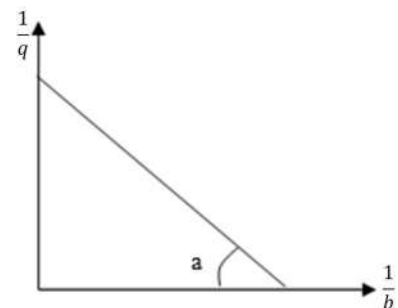


Рисунок 2 – Кривая безразличия

Чтобы определить значения относительного прироста топлива и относительного прироста воды, необходимо учитывать данные водно-энергетического расчета, знать значения гарантированных мощностей ГЭС для взятого периода и использовать критерий максимизации прибыли.

Целью водно-энергетического расчета является получение расхода воды  $Q_{ГЭС}$ :

$$N_{\text{гар}}(\mathcal{E}_{\text{мес}}) \rightarrow Q_{\text{ГЭС}}, \quad (11)$$

где  $N_{\text{гар}}(\mathcal{E}_{\text{мес}})$ , – значение гарантированной мощности ГЭС.

По расходной характеристике ГЭС определяют характеристику относительного прироста воды:

$$q = \frac{dQ_{\text{ГЭС}}}{dN_{\text{ГЭС}}}, \quad (12)$$

$$Q_{\text{ГЭС}} \geq Q_{\text{гар}}. \quad (13)$$

Уравнения баланса имеют вид:

$$B = f(N_{\text{ТЭС}}); \quad (14)$$

$$Q_{\text{ГЭС}} = f(N_{\text{ГЭС}}); \quad (15)$$

Уравнения связи учитывают выполнение энергетического баланса смешанной энергосистемы:

$$P_c = N_{\text{ГЭС}} + N_{\text{ТЭС}}; \quad (16)$$

где  $N_{\text{ГЭС}}$  – значение гарантированной мощности для периода.

Далее для расчета мощности эквивалентной ТЭС из уравнения находим разницу между мощностью системы и гарантированной мощностью ГЭС

$$N_{\text{ТЭС}} = P_c - N_{\text{ГЭС}} \quad (17)$$

По значениям вырабатываемой мощности ТЭС определяется относительный прирост расходуемого топлива к приросту мощности ТЭС. Используя расходную характеристику сжигаемого топлива на ТЭС

$$q = \frac{dB_{\text{ТЭС}}}{dN_{\text{ТЭС}}}, \quad (18)$$

находят обратные значения  $b$  и  $q$ . После этого переходят к построению кривой предельной полезности.

Использование критерия предельной полезности позволит упростить оптимизацию режимов для гидротепловых систем, поскольку будет определено равенство относительного прироста воды и топлива, когда тарифные стоимости воды и топлива будут одинаковых размерностей.

На характеристиках относительного прироста расхода воды и топлива (рисунок 3) по уравнению связи  $P_c = N_{\text{ГЭС}} + N_{\text{ТЭС}}$  определяем мощность эквивалентной ТЭС, зная  $N_{\text{ГЭС}}$ . Для каждой характеристики находим значения расхода  $b$  и  $q$ .

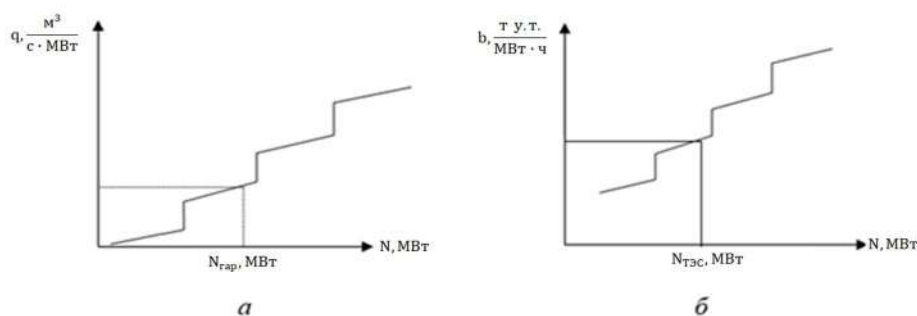


Рисунок 3 – Общий вид характеристики относительного прироста расхода воды (а) и топлива (б)

Учитываем уравнения ограничений:

$$N_{ТЭС \min} \leq N_{ТЭС} \leq N_{ТЭС \max}; \quad (19)$$

$$N_{ГЭС \min} \leq N_{ГЭС} \leq N_{ГЭС \max}. \quad (20)$$

Критерием максимизации прибыли будем считать уравнение оптимизации:

$$MR = MC, \quad (21)$$

где  $MR$  – предельный доход;

$MC$  – предельные издержки.

Производитель электроэнергии будет увеличивать свою прибыль, производя продукцию в той точке, где предельный доход равен предельным издержкам. Предельный доход определяется дифференциальной кривой спроса на энергетическую продукцию, а предельные издержки определяются дифференциальной составляющей затрат на производство энергии.

Стоимость гидроресурса остается неизвестной. Для этого вернемся к диаграмме предельной полезности и найдем угол  $\alpha$  наклона кривой безразличия. При определении цены на гидроресурс угол  $\alpha$  остается неизменным. Поэтому по его известному значению, а также по известному значению предельных издержек на топливо и величине относительного прироста расхода воды на ГЭС можно определить стоимость гидроресурса.

Цена воды на ГЭС определяется следующими формулами:

$$U_q = c_{\text{воды}} \cdot q; \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1/q}{1/b}; \quad (23)$$

$$c_{\text{воды}} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{U_b}{c_b}, \quad (24)$$

где  $U_q$  – предельные издержки на ГЭС;  $U_b$  – предельные издержки на ТЭЦ;  $b$  – относительный прирост расхода топлива на ТЭЦ;  $q$  – относительный прирост расхода воды на ГЭС;  $c_{\text{воды}}$  – цена воды для ГЭС;  $c_b$  – цена топлива для эквивалентной ТЭС.

Предельные издержки определяются по формуле:

$$MC = U_q = c_{\text{воды}} \cdot q. \quad (25)$$

По полученным значениям, которые описывают кривые предельных доходов и предельных издержек, определяются оптимальные значения выработки мощности по среднемесячной выработке  $\mathcal{E}_{\text{опт}}$  по формуле:

$$N_{\text{опт}} = \mathcal{E}_{\text{опт}} / t_{\text{мес}}. \quad (26)$$

где  $t_{\text{мес}}$  – среднее число часов в месяц.

Уравнение оптимизации:

$$MC = MR = c_{\text{воды}} \cdot q. \quad (27)$$

По полученному уравнению определяется стоимость гидроресурса при решении оптимизационных задач на ГЭС.

Используя данный критерий предельной полезности, можно выполнить следующие задачи:

определить тарифную стоимость воды;

рассчитать оптимальную мощность выработки электроэнергии для НГЭС в каждом месяце;

обосновать размер цены продаж на электроэнергию в зависимости от оптимального объема выработки.

Итак, будем использовать метод оптимизации согласно теории предельной полезности и критерий максимизации прибыли для гидротепловой системы Новосибирска. Расчеты по оптимизации режимов работы НГЭС будем проводить с учетом влияния на них Каменской поймы и без учета ее влияния.

**Описание Каменской поймы.** Главным вопросом, исследуемым в работе, является изучение влияния природного аккумулятора поймы реки Оби (от села Фоминское до г. Камень-на-Оби) на режим функционирования Новосибирской ГЭС, а также оптимизация режимов работы НГЭС с учетом влияния режима забора/отдачи гидроресурса поймой на основании критерия максимизации прибыли.

В работе будет исследовано влияние природного аккумулятора водного гидроресурса – Каменской поймы – на режимы работы ГЭС. Данная задача реализуется при помощи построения имитационных моделей прогнозирования в программных пакетах Matlab, Python путем обучения искусственного интеллекта по анализу статистических данных за период ретроспективы (исторические данные за несколько лет – с 1990 по 2012 г.). По принятой методике расчета оптимизации режима работы ГЭС без учета влияния природного аккумулятора будет произведено сравнение оптимизированных режимов, а именно: каково влияние поймы в процентном соотношении для режимов оптимизации с учетом и без учета влияния Каменской поймы на режим работы НГЭС.

Река Обь является одной из крупнейших рек мира, имеет площадь водосбора 2990 тыс. км<sup>2</sup> и общую длину 3640 км, по длине она является четвертой рекой мира. В пределах края ее длина 493 км, площадь водосбора 209,5 тыс. км<sup>2</sup>.

Каменская пойма – часть реки Обь – является местом затопления в период половодья или паводков. Берет свое начало от гидропоста у села Фоминское до гидропоста у г. Камень-на-Оби, протяженность поймы по основному устью реки составляет 417 км. Наиболее широкая ее часть находится в районе гидропоста у г. Барнаул. Территория Каменской поймы – уникальное прибрежное пространство, которое обеспечивает потенциал для развития гидроэнергетики, она выступает в виде аккумулятора энергии для НГЭС благодаря ее разливам на таком большом участке. К особенностям гидрологического режима Оби на участке у г. Барнаула следует отнести продолжительность половодья в весенне-летний период с апреля по август и наличие двух – трех подъемов уровня воды. Характерные расходы в половодье составляют 4000 – 6000 м<sup>3</sup>/с. Высота подъема уровня воды в этот период обычно достигает 4 – 5 м, в отдельные многоводные годы 6 – 7 м. По данным Центра регистра и кадастра РФ уровнем затопления для гидропоста у г. Барнаул является 520 см (133,09 м БС), опасным считается уровень 615 см (134,04 м БС). В периоды снеготаяния с 2010 по 2016 г. в пяти случаях из семи отмечался выход воды на пойму (рисунки 4 и 5) [14, 15].

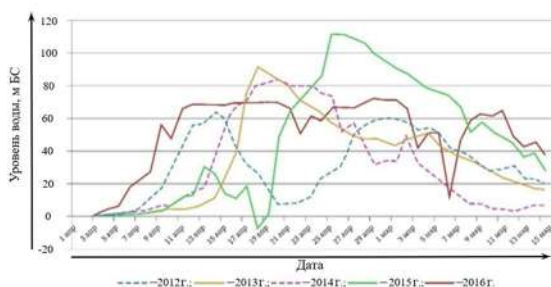


Рисунок 4 – Динамика уровня воды в протоке реки Обь Нижняя Заломная в границах Каменского района Алтайского края в весенний период 2012 – 2016 гг.

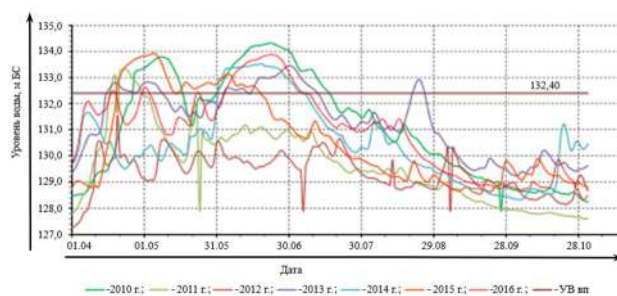


Рисунок 5 – Динамика уровня воды гидропоста у г. Барнаул за период 2010 – 2016 гг.

Управление водным ресурсом данной поймы и оптимизация работы гидроэнергетических станций требуют комплексного подхода, включающего в себя использование передовых технологий и учет уникальных характеристик каждого года.

Одним из подходов к оптимизации работы гидроэнергетических станций является прогнозирование уровня воды и контроль потребления водного ресурса. Таким образом, в данной работе по определению влияния Каменской поймы на режим работы НГЭС используются возможности искусственного интеллекта и методика оптимизации режима работы по критерию максимизации прибыли.

### **Использование нейронных сетей для изучения влияния Каменской поймы.**

Новосибирская энергосистема является энергодефицитной, а требования участников Новосибирского ВХК противоречивы, что говорит о неравномерном водном балансе, следовательно, особую значимость при управлении режимами работы НГЭС приобретает анализ водозабора и водоотдачи Каменской поймы – природного аккумулятора. Особое значение исследование Каменской поймы имеет для маловодных лет. Производимые расчеты были приведены для 2012 г., который был маловодным. В связи с этим необходимо производить компенсацию возникающего дефицита гидроресурса. В многоводные годы, напротив, излишек воды необходимо ликвидировать, так как он приводит к затоплению территорий. Территориально Каменская пойма расположена между такими городами, как Камень-на-Оби и Бийск. Наиболее широкая ее часть находится в районе гидропоста г. Барнаул. Уровень воды за период исследования с 2012 по 2016 г. у гидрологического поста г. Камень-на-Оби и у Барнаула показаны на рисунках 4 и 5.

Для учета влияния Каменской поймы по забору и отдаче воды необходимо анализировать расход воды на гидрологическом посту в конце Каменской поймы и расход воды на посту в широкой пойменной части (г. Барнаул). Учитывая данные за 21 год – в период с 1990 по 2012 г., можно судить о расходе воды в верхнем бьефе НГЭС. После определения оптимального режима работы НГЭС определяется расход воды в нижнем бьефе, где находится основная часть водопользователей Новосибирска. Таким образом, на основе анализа статистических данных по режимам аккумуляции воды Каменской поймой можно своевременно выявлять избыток или дефицит гидроресурса в верхнем и нижнем бьефах.

Анализ производится с помощью нейронных сетей. Основой анализа является информация по периоду ретроспективы о нагрузке исследуемого объекта, определение воздействующих факторов и поиск статистических связей. Стоит отметить, что нагрузка энергосистемы является стохастичной (случайной). Это связано с тем, что нагрузка зависит от различных факторов, поэтому периодичности в графиках нагрузки нет. Стоит учитывать факторы, которые влияют на отдачу Каменской поймы – климатические условия, геологические и геоморфологические условия, человеческая деятельность, биологические факторы, гидрологические факторы, сезонные колебания. По методу обучения нейронная сеть, рассматриваемая в данной работе, относится к обучению с учителем. Сети предъявляются примеры входных данных и выходных. Сеть преобразует входные данные и сравнивает свой выход с желаемым. Таким образом, можно отфильтровать получаемые прогнозы. В случае, когда допущена ошибка, человек, следящий за процессом, может запустить обучение заново, пока не будут получены искомые результаты.

Данные для прогнозирования Каменской поймы представлены в виде базы данных, подготовленной для дальнейших расчетов и включающей в себя выработку мощности на НГЭС, расход воды по водопосту г. Новосибирск (нижний бьеф), расход воды по гидропостам Барнаула, Камня-на-Оби, уровень воды по гидропостам Новосибирска, Барнаула, Камня-на-Оби.

Построим имитационную модель по уровням воды в г. Барнаул, пользуясь пакетом Python, для периода паводка 2012 г. (рисунок 6). Отобразим графики уровня воды на основе реальных и спрогнозированных по разработанной имитационной модели значений (рисунок 7).

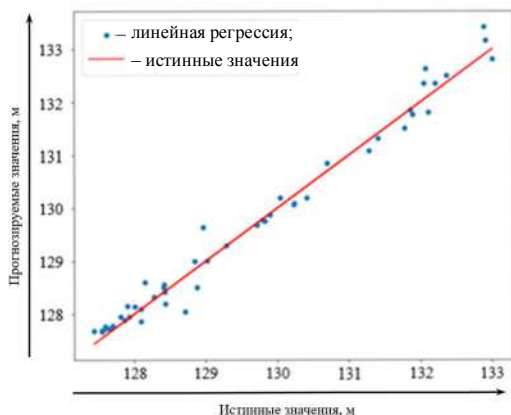


Рисунок 6 – График предсказаний по уровню воды г. Барнаул

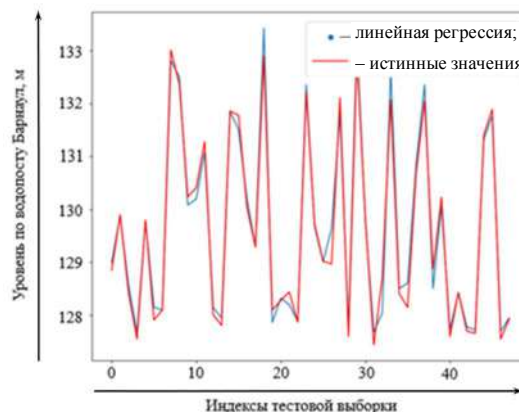


Рисунок 7 – График предсказаний по уровню воды г. Барнаул (отклонения прогнозируемых значений от реальных)

Обращаясь к графикам по уровню воды на рисунках 6 и 7, можно отметить, что разработанные имитационные модели, созданные в пакетах Python и Matlab, были составлены правильно, так как правильность имитационной модели подтверждается погрешностью порядка 6 % между реальными данными и данными прогноза. На основании этого делаем вывод о том, что имитационные модели пригодны для прогнозирования расхода воды в нижнем бьефе НГЭС.

Выполним обучение регрессионной модели в виде линейной регрессии. Для этого напишем программный код в программной среде Python с использованием пакета Pandas [5 – 7]. Результат предсказаний по расходам воды показан на рисунке 8.

Аналогичным образом было получено предсказание в программном пакете Matlab (рисунок 9).

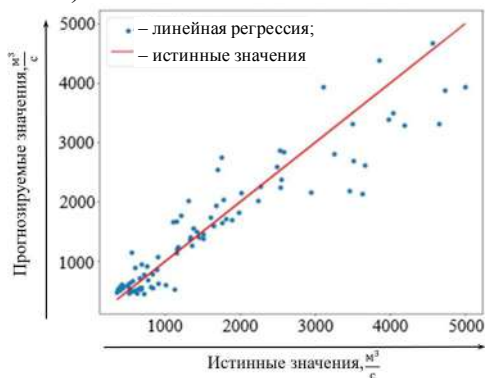


Рисунок 8 – График предсказаний расхода воды в пакете Python

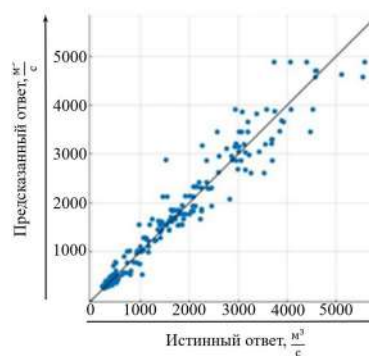


Рисунок 9 – График предсказаний в пакете Matlab

Как показывают результаты обучения нейросети в пакете Python, значение расхода воды для маловодного 2012 г. без учета влияния Каменской поймы уменьшилось на 14 % от фактического расхода воды за этот год и составило 4300 м<sup>3</sup>/с по сравнению с фактическим расходом в 5000 м<sup>3</sup>/с. Как показывают результаты обучения нейросети в пакете Matlab, значение расхода воды для маловодного 2012 г. без учета влияния Каменской поймы уменьшилось на 20 % от фактического расхода воды за этот год и составило 4000 м<sup>3</sup>/с по сравнению с фактическим расходом в 5000 м<sup>3</sup>/с. Итак, при помощи нейронных сетей были получены прогнозы изменения расходов воды и влияние Каменской поймы на расход воды в нижнем бьефе НГЭС оценено от 14 до 20 %.

**Сравнительный анализ оптимизации режимов работы Новосибирской ГЭС без учета и с учетом влияния Каменской поймы.** Для решения задач оптимизации НГЭС будем пользоваться теорией предельной полезности и критерием максимизации прибыли. По итогам расчетов будет получена оптимальная выработка мощности на НГЭС в составе смешанной

энергосистемы. По теории предельной полезности будет определена стоимость гидроресурса на НГЭС.

Так как работа ГЭС зависит от водохозяйственного комплекса, выдача мощности в графике нагрузки обусловлена гарантированной мощностью  $N_{гар}$ .

Перейдем к оптимизации НГЭС с помощью критерия максимизации прибыли, при котором соблюдается равенство предельных доходов и предельных издержек ГЭС –  $MR = MC$ .

Для оптимизации режима работы ГЭС максимизация прибыли описывается уравнениями предельного дохода и себестоимостью энергии.

Оптимизация режима работы ГЭС с учетом и без учета влияния Каменской поймы представлена на рисунках 10 и 11 соответственно.

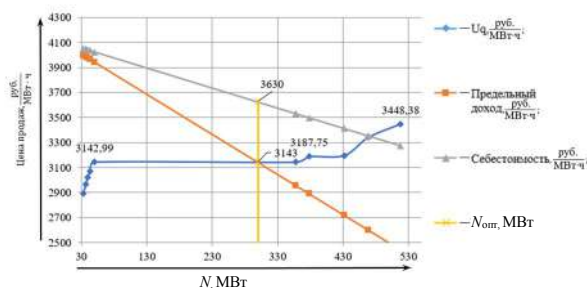


Рисунок 10 – Определение оптимального режима работы Новосибирской ГЭС для периода паводка с учетом влияния Каменской поймы на 25 мая 2012 г.

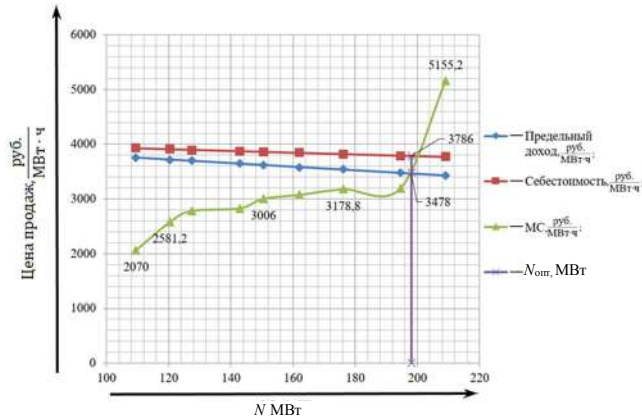


Рисунок 11 – Определение оптимального режима работы Новосибирской ГЭС для периода паводка без учета влияния Каменской поймы на 25 мая 2012 г.

Для каждого сезона 2012 г. были определены цены продаж электроэнергии на основании тарифной стоимости воды, полученной по используемому методу. Найденные результаты представлены в таблице.

Оптимальные режимы работы НГЭС для каждого сезона 2012 г.

Сезон	Межень	Паводок	Бытовой сток
$N_{опт}$ , МВт	70	300	135
Цена продаж, руб./МВт · ч	3786	3630	3700

Из данных таблицы видно, что с увеличением производимой мощности цена продаж гидроресурса уменьшается. Это связано с тем, что спрос на электроэнергию ГЭС уменьшается, так как объем предложенной продукции гидроэлектростанции начинает удовлетворять потребности в покрытии нагрузки энергосистемы.

Стоимость гидроресурса для режима работы ГЭС с учетом влияния Каменской поймы составляет: цена воды для НГЭС в период паводка – 0,13457 руб./м<sup>3</sup>, для межени – 0,1584 руб./м<sup>3</sup>, для работы на бытовом стоке – 0,1474 руб./м<sup>3</sup>.

В ходе расчетов были получены оптимальные мощности выработки НГЭС в составе гидротепловой энергосистемы. Так, для случая, когда влияние Каменской поймы учтено, оптимальная мощность равняется 300 МВт, без влияния Каменской поймы – 198 МВт.

Были получены значения тарифной стоимости воды для периода паводка 2012 г. С учетом влияния Каменской поймы – 0,13457 руб./м<sup>3</sup>, без учета влияния Каменской поймы – 0,13492 руб./м<sup>3</sup>.

Производимые по методу Лагранжа расчеты при влиянии Каменской поймы на одном из водопостов реки Обь давали среднюю мощность выработки ГЭС, равную 242,47 МВт. Сравнивая данную мощность с полученной оптимальной мощностью по критерию

максимизации прибыли в 300 МВт, можно сделать вывод о том, что для уменьшения расхода топлива на эквивалентной ТЭЦ стоит пользоваться разработанной авторами моделью, так как цена гидроресурса меньше, чем цена на топливные ресурсы.

Если сравнивать оптимальную мощность 300 МВт с действительной выработкой, изменяющейся в диапазоне 220 – 255 МВт, то влияние Каменской поймы составляет от 10 до 20 %. Это позволяет говорить о том, что использование такого природного аккумулятора, как поймы, позволяет помочь увеличить выработку мощности для энергодефицитных районов, в том числе и района г. Новосибирска.

Построены графики максимизации прибыли – цены продаж с учетом и без учета влияния Каменской поймы соответственно равны 3630 и 3786 руб./МВт·ч. Используя данный критерий, основываясь на равенстве предельных доходов и предельных издержек, можно обосновать цены продаж на электроэнергию ГЭС исходя из оптимального объема ее выработки.

Выработка мощности ГЭС напрямую зависит от количества отданной поймой воды, которая поступает на вращающуюся часть гидротурбины и приводит ее в движение кинетической и потенциальной энергией воды, что в свою очередь приводит к преобразованию механической энергии воды в электрическую энергию через гидрогенератор.

Итак, Каменская пойма представляет важное значение для дефицитной Новосибирской ЭЭС, так как характеризуется отдачей аккумулированной энергии гидроресурса и, более того, позволяет увеличить количество вырабатываемой мощности на НГЭС.

На основании изложенного сделаем выводы. В работе была разобрана методика оптимизации гидротепловой системы по методу максимизации прибыли и критерию предельной полезности, а также оптимизирован режим работы по данной методике для периода паводка в мае 2012 г. для НГЭС. Данная методика значительно проще в расчетах и понятнее, если сравнивать ее с методом оптимизации по Лагранжу. Разработанная методика позволяет также определить стоимость гидроресурса и обосновать размер цены продаж электроэнергии.

Было проведено исследование природного аккумулятора гидроресурса – Каменской поймы – и оценено ее влияние на режимы работы НГЭС. При помощи прогнозирования нейронных сетей был определен расход воды, не учитывающий Каменскую пойму.

В практической части была использована новая методика оптимизации режимов для НГЭС. Расчеты приводились для анализа влияния природного аккумулятора – были использованы данные, учитывающие влияние Каменской поймы и не учитывающие ее влияние.

В ходе расчетов были получены оптимальные мощности выработки НГЭС в составе гидротепловой энергосистемы. Так, для случая, когда влияние Каменской поймы учтено, оптимальная мощность составляет 300 МВт, без влияния Каменской поймы – 198 МВт.

Были получены тарифные стоимости воды для периода паводка в мае 2012 г. С учетом влияния Каменской поймы – 0,13457, руб./м<sup>3</sup>, без учета влияния Каменской поймы – 0,13492 руб./м<sup>3</sup>.

Производимые расчеты по методу Лагранжа при влиянии Каменской поймы на одном из водопостов р. Обь давали среднюю мощность выработки ГЭС, равную 242,47 МВт. Сравнивая данную мощность с полученной оптимальной мощностью по методу максимизации прибыли в 300 МВт, можно сделать вывод о том, что для уменьшения расхода топлива на эквивалентной ТЭЦ стоит пользоваться новой методикой, так как согласно разработанной авторами модели цена гидроресурса получается меньше, чем цена на топливные ресурсы.

Если сравнивать оптимальную мощность в 300 МВт, полученную согласно разработанной авторами методике с учетом влияния Каменской поймы, с действительной выработкой, изменяющейся в диапазоне 220 – 255 МВт, то можно оценить влияние Каменской поймы в диапазоне от 10 до 20 %. Это позволяет говорить о том, что использование такого природного аккумулятора, как речные поймы, позволяет помочь увеличить выработку мощности для энергодефицитных районов, в том числе и района Новосибирска. Более того, выдерживается требование, предъявляемое к возобновляемым источникам энергии в силу стохастического

характера выработки электроэнергии на ней, а именно по наличию аккумуляторов энергии в целях надежного энергоснабжения потребителя.

Построены графики максимизации прибыли – цены продаж с учетом влияния речной поймы и без него соответственно равны 3630 и 3786 руб./МВт·ч. Используя данный критерий, основываясь на равенстве предельных доходов и предельных издержек, можно обосновать цены продаж на электроэнергию ГЭС исходя из оптимального объема ее выработки.

## Список литературы

1. Мятаж, Т. В. Повышение энергетической эффективности генерирующей компании за счет выбора оптимальных режимов функционирования по критерию максимизации прибыли : специальность 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мятаж Татьяна Владимировна; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2005. – 19 с. – Текст : непосредственный.

2. Повышение энергетической эффективности генерирующей компании за счет выбора оптимальных режимов функционирования по критерию максимизации прибыли / В. С. Карманов, Б. Н. Мошкин, Ю. А. Секретарев [и др.]. – Текст : непосредственный // Надежность и безопасность энергетики. – 2013. – № 1 (20). – С. 35–40. – EDN PYCWVF.

3. Современное состояние водных биоресурсов : материалы международной конференции / под ред. Е. В. Пищенко, М. А. Барсукова, И. В. Морузи. – Новосибирск : Новосибирский гос. аграрный ун-т, 2016. – 96 с. – Текст : непосредственный.

4. Швецов, А. Я. Природные условия Алтайского края / А. Я. Швецов. – Барнаул : Новый формат, 2021. – 178 с. – Текст : непосредственный.

5. Sekretarev, Y. A., Myatezh, T. V., Atamanova, O. S., Rodygina, S. V., Bezmenov, S. V., & Abyshkin, R. R. (2024, June). Development of a Synergetic Model of Water Management System Regimes Determining the Optimal Capacity of a Hydroelectric Power Plant Reservoir. In *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (pp. 1540-1548). IEEE.

6. Burentsagaan, B., Osgonbaatar, T., Rusina, A. G., Sidikov, S. N., & Arestova, A. Y. (2024, June). Assessment of the Pumped Storage Hydropower Impact on the Energy Balance of Mongolian Central Power System. In *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (pp. 1390-1395). IEEE.

7. Сидорова, А. В. Среднесрочное прогнозирование естественного притока к створу ГЭС и корректировка номинальной мощности с помощью применения технологий водородной энергетики / А. В. Сидорова, С. В. Митрофанов, А. Г. Русина. – Текст : непосредственный // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 2 (419). – С. 86–99. – DOI 10.15518/isjaee.2024.02.086-099. – EDN VRLLCM.

8. Плас, Дж. В. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение / Дж. Вандер Плас. – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 576 с. – Текст : непосредственный.

9. Казанцев, Т. Искусственный интеллект и машинное обучение. Основы программирования на Python / Т. Казанцев. – ЛитРес: Самиздат, 2020. – 123 с. – Текст : непосредственный.

10. Аллен Б. Дауни. Основы Python. Научитесь думать, как программист / А. Б. Дауни; пер. с англ. С. Черникова; [науч. ред. А. Родионов]. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2021. – 304 с. – Текст : непосредственный.

11. Панова, Я. В. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений для ситуационного управления гидроагрегатами / Я. В. Панова, Ю. А. Секретарев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭПП-2018) : материалы международной научно-технической конференции / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2018. – Т. 1. – Ч. 5. – С. 384–388.

12. Секретарев, Ю. А. Исследование возможности применения обобщенного нечеткого интервала для анализа эксплуатационного состояния оборудования на гидроэлектростанциях /

Ю. А. Секретарев, Я. В. Панова. – Текст : непосредственный // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 7. – С. 17–29. – EDN ZCJGRP.

13. Сысоев, А. А. Моделирование сложных гидроэнергетических систем для исследований и обучения / А. А. Сысоев, Н. В. Лазарева, А. А. Проскурина. – Текст : непосредственный // Пром-Инжиниринг : труды всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17 – 21 мая 2021 г. – Челябинск : Южно-Уральский гос. ун-т, 2021. – С. 224–229. – EDN XJZPDC.

14. Зиновьев, А. Т. Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы / А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев. – Текст : непосредственный // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 6. – С. 17–31. – EDN RPJSDR.

15. Информационно-моделирующая система на основе компьютерной модели руслового потока: структура, определяющие уравнения, результаты расчетов / А. Т. Зиновьев, К. Б. Кошелев, К. В. Марусин, А. А. Шибких // Геоинформационные технологии и математические модели для мониторинга и управления экологическими и социально-экономическими системами. – Барнаул : ООО «Пять плюс», 2011. – С. 55–62. – Текст : непосредственный. – EDN QMGDZH.

## References

1. Myatezh T.V. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti generiruiushchei kompanii za schet vybora optimal'nykh rezhimov funktsionirovaniia po kriteriiu maksimizatsii pribyli* (Increasing the energy efficiency of a generating company through the selection of optimal modes is maintained according to the criterion of profit maximization). Doctor's thesis abstract, Novosibirsk, NSTU, 2005, 19 p. (In Russian).

2. Karmanov V.S., Moshkin B.N., Sekretarev Yu.A., Chekalina T.V., Yakovchenko K.N. Increasing the energy efficiency of the generating company through the selection of optimal operating modes by the criterion of maximizing profit. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki – Safety and Reliability of Power Industry*, 2013, no. 1 (20), pp. 35-40. EDN PYCWVF. (In Russian).

3. Pishchenko E.V., Barsukova M.A., Moruzi I.V. ed. *Sovremennoe sostoianie vodnykh bioresursov : materialy mezhdunarodnoi konferentsii* [Current state of aquatic biological resources: proceedings of the international conference]. Novosibirsk, Novosibirsk State Agricultural University Publ., 2016, 96 p. (In Russian).

4. Shvetsov A.Ya. *Prirodnye usloviia Altaiskogo kraia* [Natural conditions of the Altai Territory]. Barnaul, New Format Publ., 2021, 178 p. (In Russian).

5. Sekretarev, Y. A., Myatezh, T. V., Atamanova, O. S., Rodygina, S. V., Bezmenov, S. V., & Abyshkin, R. R. (2024, June). Development of a Synergetic Model of Water Management System Regimes Determining the Optimal Capacity of a Hydroelectric Power Plant Reservoir. In *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (pp. 1540-1548). IEEE.

6. Burentsagaan, B., Osgonbaatar, T., Rusina, A. G., Sidikov, S. N., & Arestova, A. Y. (2024, June). Assessment of the Pumped Storage Hydropower Impact on the Energy Balance of Mongolian Central Power System. In *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (pp. 1390-1395). IEEE.

7. Sidorova A.V., Mitrofanov S.V., Rusina A.G. Medium-term forecasting of natural inflow to the hydroelectric station and adjustment of the nominal power through the use of hydrogen energy technologies. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya – Alternative Energy and Ecology*, 2024, no. 2 (419), pp. 86-99. DOI 10.15518/isjaee.2024.02.086-099. EDN VRLLCM. (In Russian).

8. Plas J. Vander. *Python dlia slozhnykh zadach: nauka o dannykh i mashinnoe obuchenie* [Python for Complex Problems: Data Science and Machine Learning]. St. Petersburg, Piter Publ., 2018, 576 p. (In Russian).

9. Kazantsev T. *Iskusstvennyi intellekt i mashinnoe obuchenie. Osnovy programmirovaniia na Python* [Artificial Intelligence and Machine Learning. Basics of programming in Python]. Litres: Samizdat Publ., 2020, 123 p. (In Russian).

10. Allen B. Downey. *Osnovy Python. Nauchites' dumat', kak programmist* [Python Basics. Learn to think like a programmer]. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 2021, 304 p. (In Russian).

11. Panova Ya.V., Sekretarev Yu.A. [Development of an intelligent decision support system for situational control of hydraulic units]. *Aktual'nye problemy elektronnoho priborostroeniia (APEPP-*

2018) : *materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Current problems of electronic instrument engineering (APEPP-2018): proceedings of the international scientific and technical conference]. Novosibirsk, 2018, vol. 1, part 5, pp. 384-388. (In Russian).

12. Sekretarev Yu.A., Panova Ya.V. Research on the possibility of using a generalized fuzzy interval to analyze the operating modes of power equipment at hydroelectric power plants. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electric Power Industry*, 2017, no. 7, pp. 17-29. EDN ZCJGRP. (In Russian).

13. Sysoev A.A., Lazareva N.V., Proskurina A.A. [Modeling complex hydropower systems for research and teaching]. *Prom-Inzhiniring : trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Prom Engineering : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Chelyabinsk, 2021, pp. 224-229. EDN XJZPDC. (In Russian).

14. Zinovyev A.T., Koshelev K.B. Simulation of the floodplain territories inundation for the major rivers' parts with complicated morphometry of the bed and floodplain. *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie – Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2013, no. 6, pp. 17-31. EDN RPJSDR. (In Russian).

15. Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Marusin K.V., Shibkikh A.A. Information modeling system based on a computer model of channel flow: structure, defining equations, calculation results. *Geoinformatsionnye tekhnologii i matematicheskie modeli dlia monitoringa i upravleniia ekologicheskimi i sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami* [Geoinformation technologies and mathematical models for monitoring and management of environmental and socio-economic systems]. Barnaul, Pyat plus LLC Publ., 2011, pp. 55-62. EDN QMGDZH. (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.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

### Донченко Семён Сергеевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

### Капустин Владимир Алексеевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: kapustin.vladimir.99@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мятеж, Т. В. Оптимизация режимов работы Новосибирской гидроэлектростанции с учетом влияния Каменской поймы / Т. В. Мятеж, С. С. Донченко, В. А. Капустин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 112 – 126.

## 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.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

### Donchenko Semyon Sergeevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

Master's student of the department «Power Supply Systems for Enterprises».

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: donchenko.s@inbox.ru

### Kapustin Vladimir Alekseyevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

Master's student of the department «Power Supply Systems for Enterprises».

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: kapustin.vladimir.99@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Myatezh T.V., Donchenko S.S., Kapustin V.A. Optimization of operating modes of the Novosibirsk hydroelectric power plant with consideration of the influence of the Kamenskaya floodline. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 112-126. (In Russian).

УДК 629.4.069

**А. А. Плешаков**

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

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

**Аннотация.** Статья посвящена разработке и исследованию в пакетах прикладных программ MATLAB/Simulink комплексной математической модели перспективной системы запуска силовой установки автономного локомотива. Автором предлагается использовать тяговый генератор для прокрутки коленчатого вала двигателя в процессе запуска. В работе представлены общая структура разработанной имитационной модели и детальное описание всех блоков, включая пусковой преобразователь и его систему управления, аккумуляторную батарею, синхронный генератор, систему управления верхнего уровня и блок нагрузки, имитирующий момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала дизельного двигателя в зависимости от кинематической вязкости моторного масла. В рамках исследования учтены параметры электрической и механической частей системы запуска, в качестве прототипов взяты существующие устройства из состава тепловоза 3ТЭ28 (тяговый агрегат, дизельный двигатель, аккумуляторная батарея), что позволяет наиболее точно описать процессы, происходящие при запуске силовой установки локомотива. Представлены уравнения, описывающие функционирование регулятора тока возбуждения, блока повышения входного напряжения и трехфазного инвертора, входящих в пусковой преобразователь. В заключительной части статьи приведены результаты моделирования при различных наборах управляющих параметров. Разработанная имитационная модель может быть модифицирована и использована для исследования инверторных систем запуска новых серий локомотивов с учетом параметров их силовой установки, а также для конечной настройки алгоритмов системы автоматического управления пускового преобразователя.

**Ключевые слова:** комплексная имитационная модель, синхронный генератор, пусковой преобразователь, дизель-генератор, прокрутка коленчатого вала дизеля, момент сопротивления прокручиванию.

**Andrey A. Pleshakov**

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

## SIMULATION MODEL FOR THE INVERTER SYSTEM OF DIESEL LOCOMOTIVE ENGINE STARTING SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT DIESEL GENERATOR PARAMETERS

**Abstract.** The article is devoted to the development and study of an integrated mathematical model of an advanced system for starting the power plant of a self-contained locomotive in MATLAB/Simulink software packages. The author proposes to use a traction generator to crank the engine crankshaft during the start-up process. The paper provides the general structure of the developed simulation model, as well as a detailed description of all units, including the starting converter and its control system, the battery, the synchronous generator, the upper-level control system and the load unit simulating the moment of resistance to diesel engine crankshaft cranking depending on the kinematic viscosity of engine oil. The study takes into account parameters of electrical and mechanical parts of the starting system, using existing devices of 3TE28 diesel locomotive (traction unit, diesel engine, battery) as prototypes, which allows for the most accurate description of processes occurring during the start-up of the locomotive power plant. The equations describing the operation of the excitation current regulator, the input voltage booster unit and the three-phase inverter included in the starting converter are provided. The final part of the article provides the simulation results for different sets of control parameters. The developed simulation model can be modified and used to study inverter systems to start new series locomotives taking into account parameters of their power plant, as well as for the final adjustment of algorithms of the starting converter automatic control system.

**Keywords:** integrated simulation model, synchronous generator, starting converter, diesel generator, diesel engine crankshaft rotation, moment of resistance to cranking.

На текущем этапе научно-технического прогресса невозможно представить процесс проектирования сложных технических устройств или систем без математического моделирования.

Практическая реализация возможностей математического моделирования и вычислительного эксперимента существенно повышает эффективность инженерных разработок, особенно при создании принципиально новых устройств [1].

Одними из видов математических моделей являются имитационные математические модели. Данный вид моделей представляет собой совокупность описания элементов системы, взаимосвязей элементов друг с другом, внешних воздействий, алгоритмов функционирования системы (или правил изменения состояний) под влиянием внешних и внутренних возмущений. Для реализации таких моделей используются вычислительные средства, средствами формализованного описания служат универсальные или специальные алгоритмические языки.

Имитационное моделирование остается практически единственным доступным методом получения информации о поведении сложных систем в условиях неопределенности, что особенно важно на этапе их проектирования. Данным методом можно определять структуру, параметры и алгоритмы управления синтезируемой системы и имитировать поведение системы в различных условиях [2].

**Инверторная система запуска двигателей локомотивов.** К сложным техническим системам, имеющим большое количество элементов и взаимосвязей между собой, относится система запуска двигателя автономного локомотива, как правило, дизельного или газового.

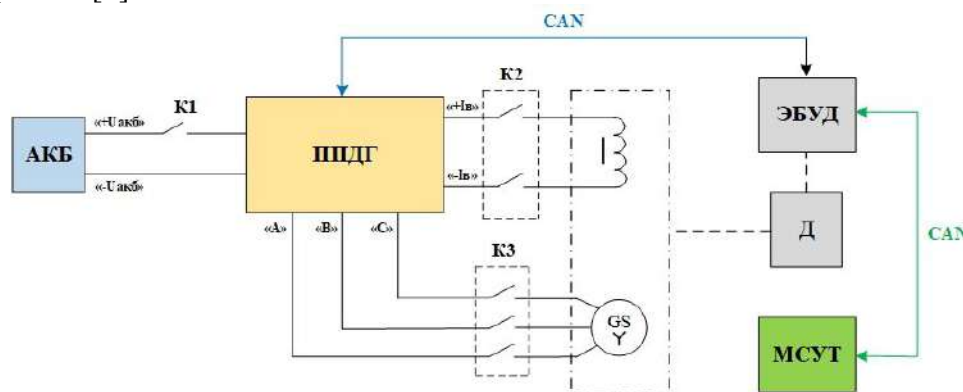
В общем случае современная система запуска силовой установки локомотива включает в себя следующие основные элементы:

- автономный источник энергии;
- устройство предварительной раскрутки коленчатого вала двигателя;
- топливную аппаратуру двигателя;
- электрические насосы для прокачки масла и топлива;
- электронный блок управления двигателем;
- электрические коммутационные аппараты;
- систему подогрева теплоносителей двигателя.

Перспективным техническим решением в части совершенствования систем запуска двигателей локомотивов и повышения показателей их эксплуатационной надежности является внедрение инверторов в качестве устройств предварительной раскрутки коленчатого вала.

В данном техническом решении предварительную раскрутку коленчатого вала двигателя выполняет синхронный генератор, кратковременно работающий в двигательном режиме и получающий питание от пускового преобразователя [3].

Упрощенная структурная схема такой системы приведена на рисунке 1 и подробно описана в работе [4].



АКБ – аккумуляторная батарея; К1 – К3 – силовые контакторы; ППДГ – преобразователь пусковой дизель-генератора; GS – синхронный генератор; ЭБУД – электронный блок управления дизеля; Д – дизель; МСУТ – микропроцессорная система управления тепловоза; CAN – сеть передачи данных (Controller Area Network)

Рисунок 1 – Упрощенная структурная схема системы запуска двигателя с применением пускового преобразователя

При проектировании инверторной системы запуска необходимо комплексно рассматривать и учитывать множество различных параметров, таких как:

- номинальное напряжение и потребляемый ток от аккумуляторной батареи;
- емкость аккумуляторной батареи;
- напряжение питания, ток возбуждения и фазные токи тягового генератора при питании от пускового преобразователя;
- время и темп раскрутки коленчатого вала двигателя;
- момент инерции тягового генератора;
- моменты инерции вращающихся масс двигателя;
- температурно-вязкостная характеристика моторного масла.

Учесть влияние электрических параметров аккумуляторной батареи, тягового генератора и пускового преобразователя, а также механические параметры дизель-генератора и алгоритмы управления запуском силовой установки в целом позволяет комплексная имитационная модель данной технической системы.

**Имитационная модель системы запуска силовой установки локомотива.** Модель системы запуска дизельного двигателя тепловоза 3ТЭ28 разработана в пакете прикладных программ *MATLAB/Simulink*. Выбор данного инструмента обусловлен наличием широкого спектра библиотек, которые могут быть использованы при моделировании в различных областях науки и техники. В настоящее время пакеты *MATLAB/Simulink* являются одними из лучших для моделирования электротехнических устройств и систем. Сочетание библиотечных блоков и разработанных пользователем собственных элементов предоставляет возможность формирования имитационной модели любой сложности.

Общая структура разработанной модели приведена на рисунке 2.

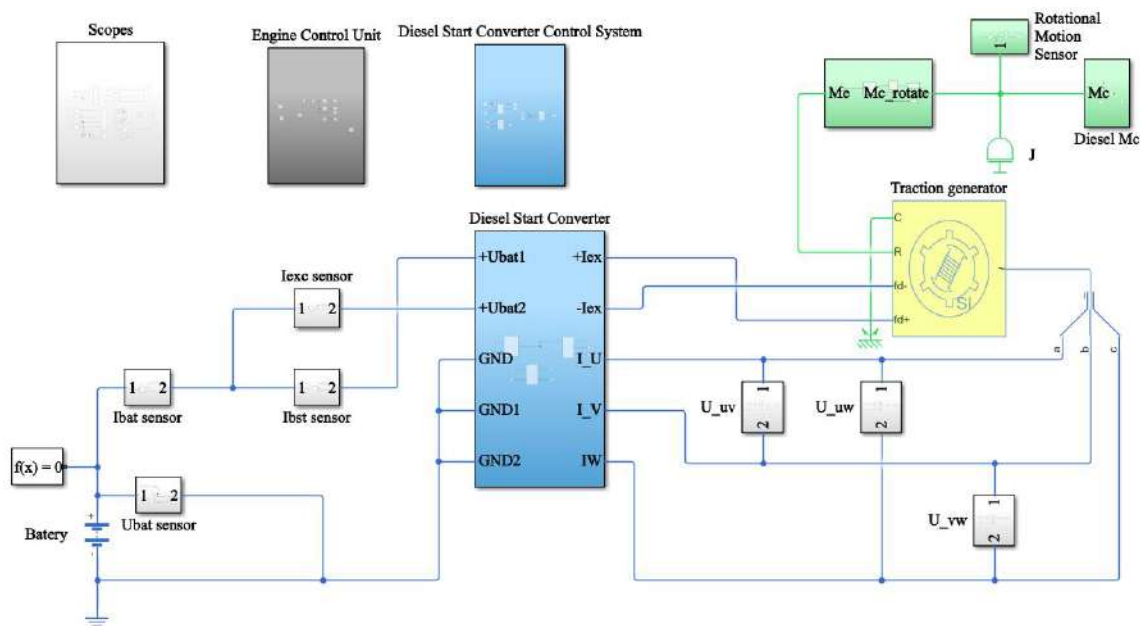


Рисунок 2 – Общая структура модели инверторной системы запуска двигателя

Имитационная модель включает в себя следующие основные компоненты:

- *Battery* – аккумуляторную батарею;
- *Diesel Start Converter* – пусковой преобразователь;
- *Traction generator* – тяговый генератор;
- *Engine Control Unit* – электронный блок управления дизелем;
- *Diesel Start Converter Control System* – систему автоматического управления пускового преобразователя;
- *J* – блок, имитирующий момент инерции ротора тягового генератора;

– *Diesel Mc* – блок, имитирующий момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала двигателя;

– датчики тока, напряжения, момента, углового смещения, частоты вращения;

– *Scopes* – блок визуализации результатов измерения.

В качестве параметров блока *Battery* устанавливаются технические характеристики щелочной никель-кадмиевой аккумуляторной батареи типа 72КРН220Р, которая применяется в качестве независимого источника энергии тепловоза 3ТЭ28.

Основные технические характеристики батареи приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Технические характеристики батареи типа 72КРН220Р

Номинальное напряжение элемента, В	Количество элементов в батарее, шт.	Номинальное напряжение батареи, В	Номинальная емкость, А·ч	Режим разряда
1,2	72	86,4	220	короткий

Элемент *Diesel Start Converter* является моделью пускового преобразователя, разработанной на базе электрической принципиальной схемы устройства. В состав компонента входят следующие функционально законченные блоки:

– регулятор тока возбуждения *Excitation block*;

– звено повышения входного напряжения *Boost block*;

– модуль автономного инвертора напряжения *Inverter block*.

Структура блока *Diesel Start Converter* приведена на рисунке 3.

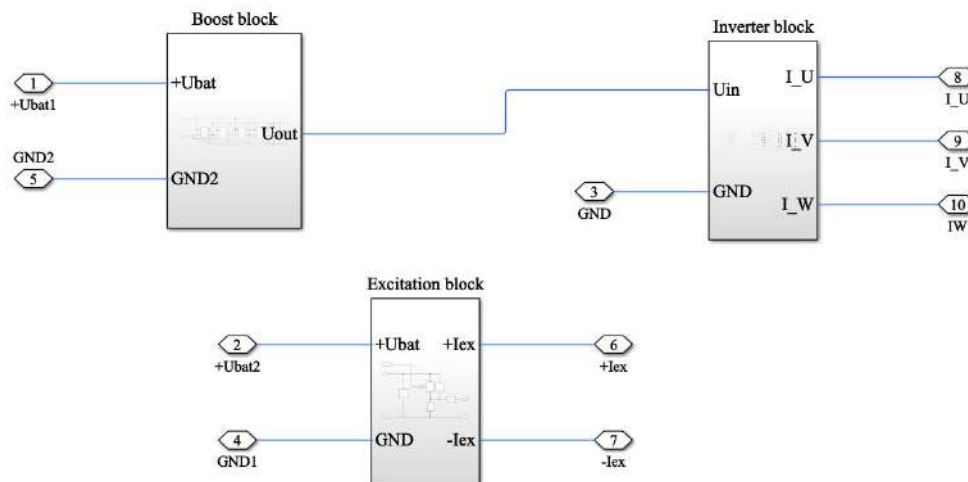


Рисунок 3 – Структура модели пускового преобразователя

В состав регулятора тока возбуждения входит *IGBT*-модуль с антипараллельным диодом, снабберный конденсатор, диод для замыкания тока, протекающего через обмотку возбуждения тягового генератора при отключении силового ключа, конденсатор фильтра.

Модуль повышения входного напряжения состоит из четырех одинаковых блоков, включенных параллельно и объединенных по выходу. В состав каждого блока входит *IGBT*-модуль с антипараллельным диодом, снабберный конденсатор, дроссель накопления энергии, силовой диод и конденсатор, сглаживающий выходные пульсации.

Модуль инвертора представляет собой мостовой инвертор напряжения, собранный на базе *IGBT*-модулей с антипараллельными диодами и снабберными конденсаторами.

Параметры элементов, используемых в модели, взяты из технической документации на комплектующие, применяемые в электрической принципиальной схеме преобразователя.

Подробная структура указанных блоков, их функциональные связи приведены в источнике [3].

Элемент *Traction generator* – это блок имитационной модели синхронной явнополюсной машины без успокоительной демпферной обмотки из библиотеки *Simscape* пакета *Simulink*.

В качестве прототипа электрической машины переменного тока, параметры которой устанавливаются в блоке *Traction generator* в модели, используется синхронный тяговый агрегат типа АТ2С-2800/400Х, который устанавливается на тепловозе 3ТЭ28. При моделировании тяговый генератор рассматривается как элемент электропривода (трехфазный двигатель переменного тока) с учетом свойств обратимости электрических машин.

Основные технические характеристики агрегата приведены в таблице 2 [6].

Таблица 2 – Основные технические характеристики тягового агрегата АТ2С-2800/400х

Наименование параметра	Тяговый генератор	Вспомогательный генератор
Мощность, кВт	2800	400
Напряжение линейное, В	580 / 365	400
Ток фазный, А	$2 \times 1520 / 2 \times 2400$	$2 \times 490$
Частота вращения номинальная, об/мин	1000	
Частота тока, Гц	100	
Количество пар полюсов	6	6
КПД, %	95,5 / 95,0	90
Тип охлаждения	Воздушное, принудительное	
Режим работы	Продолжительный	

В модели установлены следующие основные параметры синхронной электрической машины:

- количество пар полюсов;
- $L_d, L_q$  – индуктивности обмоток статора по продольной и поперечным осям  $d$  и  $q$ ;
- $L_f$  – полная индуктивность обмотки возбуждения;
- $L_0$  – индуктивность рассеяния фазы статора для нулевой последовательности фаз;
- $R_a$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;
- $R_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;
- $J$  – момент инерции ротора.

Компонент модели *Engine Control Unit* задает начальные параметры процесса запуска, которые формирует электронный регулятор двигателя для системы автоматического управления пускового преобразователя.

Регулятор устанавливает следующие параметры:

- максимальную длительность процесса прокрутки коленчатого вала двигателя, которая задается в настройках пакета *MATLAB* и равна длительности моделирования;
- ток возбуждения синхронного генератора  $I_{exc\_ref}$ ;

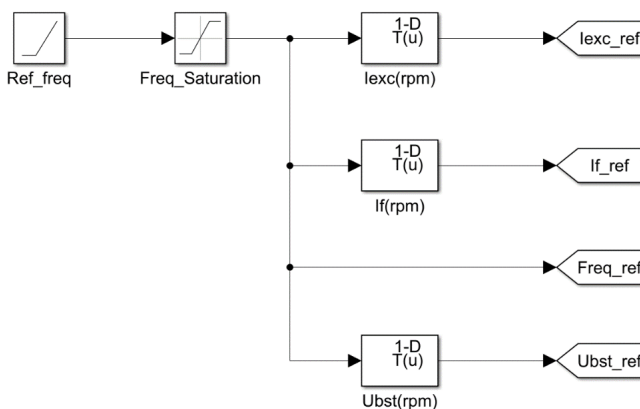


Рисунок 4 – Структура блока *Engine Control Unit*

- фазный ток статорной обмотки  $I_f\_ref$ ;
- заданную частоту вращения ротора генератора  $Freq\_ref$ ;
- напряжение в звене постоянного тока  $U_{bst}$ .

В модели данные параметры задаются в табличном виде в зависимости от текущей частоты вращения вала генератора.

Структура элемента *Engine Control Unit* приведена на рисунке 4.

Блок *Diesel Start Converter Control System* представляет собой модель системы автоматического управления пускового преобразователя.

Общая структура указанного элемента приведена на рисунке 5.

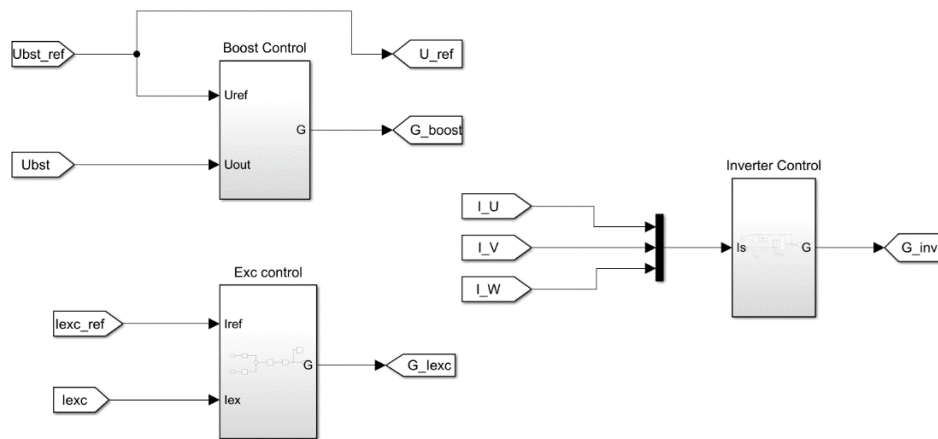


Рисунок 5 – Структура блока *Diesel Start Converter Control System*

В состав подсистемы *Boost Control* входят дискретный ПИ-регулятор, который рассчитывает необходимый коэффициент заполнения ШИМ-сигнала на основании рассогласования между заданным напряжением в звене повышения входного напряжения  $U_{bst\_ref}$  и измеренным значением  $U_{bst}$ , и ШИМ-генератор, формирующий вектор из четырех управляющих сигналов  $G_{boost}$  для IGBT-модулей повышающего звена пускового преобразователя. В модели несущая частота ШИМ составляет 10 кГц.

Регулирование выходного напряжения  $U_{out}$  повышающего преобразователя осуществляется за счет изменения коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала.

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{1-D}, \quad (1)$$

где  $U_{in}$  – входное напряжение источника питания;  $D$  – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала.

Управление регулятором тока возбуждения синхронного генератора осуществляет подсистема *Exc Control* на основе значений заданного тока возбуждения  $I_{exc\_ref}$  и измеренного  $I_{exc}$ . Блок реализует гистерезисный регулятор тока, управляя переключением силового модуля посредством сигнала  $G_{Iexc}$ . При пересечении сигналом  $I_{exc}$  нижней границы полосы гистерезиса формируется сигнал на включение IGBT-модуля, а при превышении верхней границы происходит отключение транзистора. Ширина полосы гистерезиса в описываемой модели составляет  $\pm 5$  А относительно заданного значения тока возбуждения  $I_{exc\_ref}$ .

Среднее значение тока возбуждения  $I_{exc\ cp}$  за период  $T = t_{on} + t_{off}$  в установившемся режиме определяется по формуле [3]:

$$I_{exc\ cp} = \frac{1}{T} \cdot \left( \int_0^{t_{on}} I_{exc1} dt + \int_{t_{on}}^{t_{on}+t_{off}} I_{exc2} dt \right) = \frac{1}{T} \cdot \frac{U_{in} \cdot t_{on}}{R_{exc}}, \quad (2)$$

где  $U_{in}$  – входное напряжение источника питания;  $T$  – период управляющего ШИМ-сигнала;  $I_{exc1}$  – ток, протекающий через открытый транзистор и обмотку возбуждения генератора;  $I_{exc2}$  – ток, протекающий через обмотку возбуждения генератора и диод после закрытия управляющего ключа;  $t_{on}$  – длительность сигнала на включение IGBT-модуля;  $t_{off}$  – длительность сигнала на отключение IGBT-модуля.

Наиболее сложную структуру имеет подсистема *Inverter Control*, которая управляет IGBT-модулями инвертора напряжения, формируя ток переменной амплитуды и частоты для статорной обмотки синхронного генератора. Следует отметить, что блок *Inverter Control* реализует алгоритмы управления инвертором без данных о текущем угловом положении ротора тягового генератора, что значительно повышает их сложность.

В синхронной машине механическая частота вращения ротора находится в строгой зависимости от питающей частоты и равна частоте магнитного поля. Плавно регулируя частоту тока статорной обмотки при заданном значении тока, протекающего через обмотку возбуждения, можно привести во вращение ротор синхронного генератора, который в свою очередь связан с коленчатым валом дизельного двигателя. Таким способом можно раскрутить коленчатый вал дизельного двигателя до необходимой частоты и осуществить его запуск.

Основные элементы подсистемы *Inverter Control* приведены на рисунке 6.

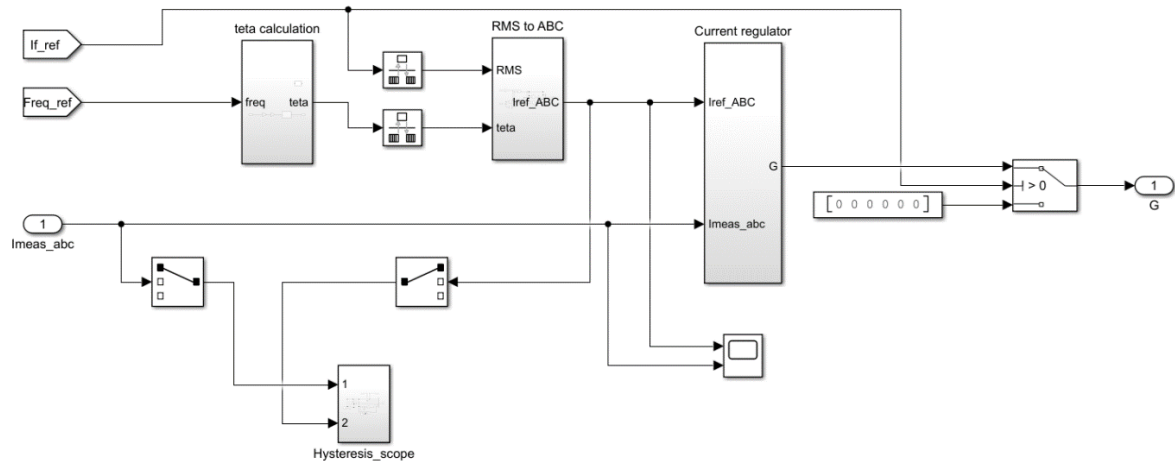


Рисунок 6 – Структура подсистемы *Inverter Control*

Блок *teta Calculation* рассчитывает текущий фазовый электрический угол *teta* в зависимости от изменения механической частоты вращения ротора синхронного генератора. С учетом количества полюсов угол *teta* рассчитывается по формуле:

$$teta = \int_0^{2\pi} \frac{2\pi \cdot n \cdot p}{60}, \quad (3)$$

где *n* – механическая частота вращения ротора; *p* – количество пар полюсов.

Расчет значений фазных токов статорной обмотки синхронной машины производится в блоке *RMS to ABC* на базе заданного значения тока *If\_ref*.

В блоке рассчитывается длина обобщенного вектора фазных статорных токов  $\vec{I}_s$ , после чего определяются проекции данного вектора на оси  $\alpha$  и  $\beta$  в двухфазной неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ :

$$I_s = \sqrt{2} \cdot I_{f\_ref}; \quad (4)$$

$$i_\alpha = I_s \cdot \cos teta; \quad (5)$$

$$i_\beta = I_s \cdot \sin teta, \quad (6)$$

где  $i_\alpha, i_\beta$  – проекции  $\vec{I}_s$  на оси  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно; *teta* – электрический фазовый угол.

На третьем этапе вычислений выполняются координатные преобразования для перехода из двухфазной системы координат  $\alpha\beta$  в трехфазную (неподвижную) систему *ABC*. Расчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$I_{ref\_A} = i_\alpha; \quad (7)$$

$$I_{ref\_B} = \frac{\sqrt{3} \cdot i_\beta - i_\alpha}{2}; \quad (8)$$

$$I_{ref\_c} = \frac{-i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta}{2}, \quad (9)$$

где  $I_{ref\_A}, I_{ref\_B}, I_{ref\_C}$  – рассчитанные значения фазных токов статора.

Элемент подсистемы *Current Regulator* представляет собой гистерезисный релейно-векторный регулятор тока. В данном блоке вычисляются отклонения измеренных фазных токов  $I_{meas\_abc}$  от заданных  $I_{ref\_ABC}$ , которые формируют вектор ошибки токов статора  $\vec{\Delta I_s}(\Delta I_a, \Delta I_b, \Delta I_c)$ .

Компоненты дискретного вектора управления *IGBT*-транзисторами рассчитываются в соответствии со следующими выражениями:

$$S_{Ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta I_j > \delta_{lim}; \\ -1, & \text{если } \Delta I_j < -\delta_{lim}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta I_j = I_{refj} - I_{measj}, \quad (11)$$

где  $j$  указывает на соответствующую фазу  $A, B, C$ ;  $S_I$  – векторная дискретная функция токовых ошибок по каждой фазе;  $I_{refj}$  – компоненты вектора заданного значения тока для каждой фазы;  $I_{measj}$  – компоненты вектора измеренных мгновенных значений фазных токов;  $\delta_{lim}$  – пороговое значение токовой ошибки.

Геометрическая интерпретация вектора токовых ошибок в трехфазной неподвижной системе координат  $ABC$ , связанной со статором электрической машины, приведена на рисунке 7 [8].

Номер сектора токовых ошибок  $Nsec$  (таблица 3) определяется на основании состояний дискретных функций, рассчитанных по формулам (10) и (11).

Векторы с номерами 1–6 называются активными, векторы 7 и 8 – пассивными, или нулевыми.

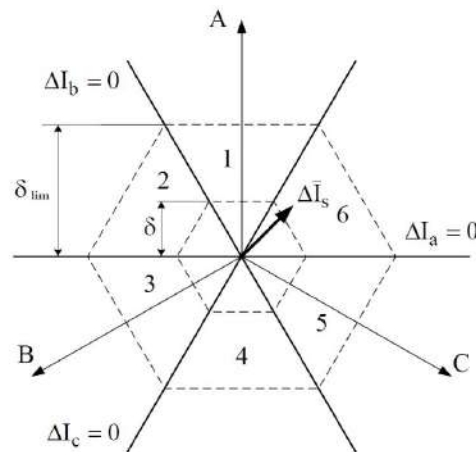


Рисунок 7 – Векторная диаграмма токовых ошибок

Таблица 3 – Определение номера сектора токовых ошибок по их дискретным функциям

$S_{Ia}, S_{Ib}, S_{Ic}$	1, -1, -1	1, 1, -1	-1, 1, -1	-1, 1, 1	-1, -1, 1	1, -1, 1	-1, -1, -1	1, 1, 1
$Nsec$	1	2	3	4	5	6	7	8

В зависимости от номера сектора в блоке *Current Regulator* формируется выходной вектор управления  $G$  для шести *IGBT*-модулей инвертора. Компоненты вектора в зависимости от текущего сектора представлены в таблице 4, значение «1» соответствует управляющему сигналу на включение транзистора, «0» – на отключение.

Таблица 4 – Определение вектора управления *IGBT*-модулями в зависимости от сектора токовых ошибок

Номер сектора	1	2	3	4	5	6	7	8
Вектор управления	[1 0 0 1 0 1]	[1 0 1 0 0 1]	[0 1 1 0 0 1]	[0 1 1 0 1 0]	[0 1 0 1 1 0]	[1 0 0 1 1 0]	[0 0 0 0 0 0]	[1 1 1 1 1 1]

Подсистема модели *Diesel Mc* моделирует момент сопротивления, которое оказывает дизельный двигатель при раскрутке его коленчатого вала в процессе запуска.

В описываемой имитационной модели используются параметры дизельного двигателя 18-9ДГМ из состава тепловоза 3ТЭ28. Основные технические характеристики двигателя приведены в таблице 5 [6].

Таблица 5 – Основные технические характеристики двигателя 18-9ДГМ

Наименование параметра	Значение
Тип дизеля	V-образный, четырехтактный, 16-цилиндровый, с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Ход поршня, см	26
Диаметр цилиндра, см	26
Номинальная мощность, кВт (л. с.), не менее	2850 (3876)
Масло смазочное моторное	М-14Д <sub>2</sub> СЕ

Для пуска дизельного двигателя необходимо прокручивать его коленчатый вал с частотой вращения около 100...300 об/мин (в зависимости от модели двигателя), что позволяет создать необходимые параметры всасываемого в цилиндры воздушного заряда и требуемые давления впрыскиваемого топлива.

При определении пусковой частоты вращения коленчатого вала основным параметром является сопротивление прокручиванию двигателя. Суммарное сопротивление движению деталей и механизмов при пуске двигателя принято оценивать величиной момента сопротивления прокручиванию, зависящей от вязкости моторного масла, площади поверхностей трения, частоты вращения, неравномерности вращения коленчатого вала и потерь рабочего тепла в процессах сжатия и расширения.

Расчет момента сопротивления прокручиванию дизельного двигателя  $M_c$  выполняется в модели по следующей эмпирической формуле [9]:

$$M_c = 0,875 \cdot V_h \cdot i \cdot (0,11 + 0,22 \cdot \frac{n}{100}) \cdot \gamma^{0,39}, \quad (12)$$

где  $V_h$  – рабочий объем цилиндра двигателя;  $i$  – количество цилиндров;  $n$  – частота вращения коленчатого вала двигателя при прокручивании;  $\gamma$  – вязкость моторного масла.

Рабочий объем цилиндра  $V_h$  определяется в соответствии с формулой:

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot S}{4}, \quad (13)$$

где  $D$  – диаметр цилиндра;  $S$  – ход поршня.

Кинематическая вязкость является одной из важнейших характеристик моторного масла, которая определяет диапазон температур окружающей среды, в котором обеспечивается безопасный запуск двигателя без предварительного подогрева.

Кинематическая вязкость моторного масла  $\gamma$  зависит от его температуры – с понижением температуры вязкость увеличивается. Так, при температуре масла типа М-14Д<sub>2</sub>СЕ, равной +100 С°,  $\gamma = 13,5...15$  мм<sup>2</sup>/с, а при температуре +40 С°  $\gamma \approx 105$  мм<sup>2</sup>/с [10].

Блок модели  $J$  учитывает момент инерции ротора генератора. Значение момента инерции устанавливается в модели в соответствии с данными, предоставленными производителем электрической машины.

Компонент  $Scopes$  используется для визуализации результатов моделирования и содержит несколько виртуальных осциллографов, которые в графическом виде отображают измеряемые или рассчитанные параметры работы системы запуска.

**Результаты моделирования.** На рисунке 8, *а* приведены осциллограммы измеренной  $n_{meas}$  и задаваемой  $freq\_ref$  частоты вращения ротора синхронного генератора; на рисунке 8, *б* – осциллограмма тока, потребляемого от аккумуляторной батареи в процессе запуска.

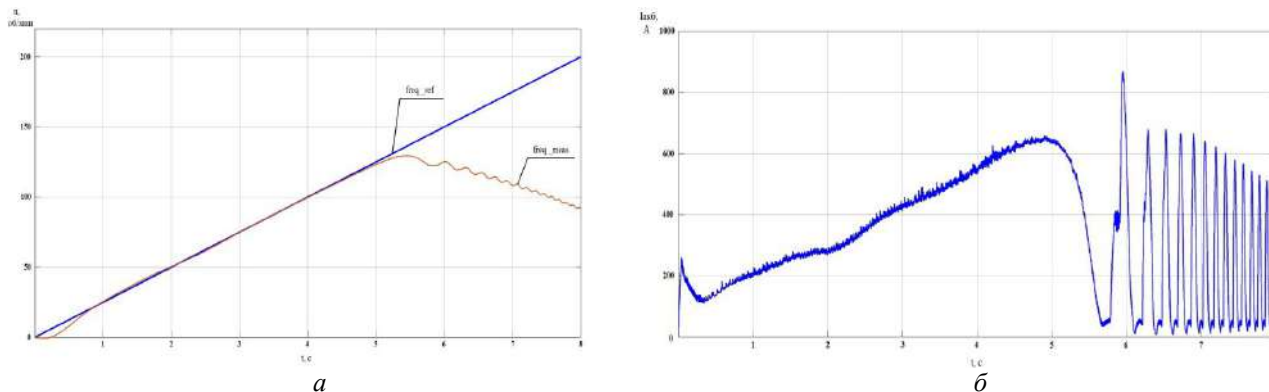


Рисунок 8 – Осциллограммы запуска двигателя при температуре моторного масла, равной 15 °С: заданная и измеренная частоты (*а*) и ток, потребляемый от аккумуляторной батареи (*б*)

В модели установлены следующие параметры:

- время прокрутки – 8 с;
- заданный фазный ток  $I_{f\_ref}$  – 600 А;
- заданное напряжение накачки  $U_{bst\_ref}$  – 100 В;
- заданный ток возбуждения  $I_{exc\_ref}$  – 120 А;
- начальное напряжение аккумуляторной батареи – 60 В;
- момент сопротивления прокручиванию  $M_c$  рассчитан с кинематической вязкостью масла  $\gamma$  при температуре 15 °С;
- темп набора частоты вращения при раскрутке – 25 об/с.

Данный режим характеризуется сочетанием пониженного напряжения аккумуляторной батареи и низкой температуры моторного масла дизельного двигателя, что ухудшает условия его запуска.

В результате анализа осциллограмм выявлено, что при описанном выше сочетании заданных параметров невозможно раскрутить двигатель до заданной частоты в 200 об/мин. Начиная с пятой секунды прокрутки, электрическая машина выходит из синхронизма и периодически переходит в генераторный режим, о чем свидетельствуют колебания тока, потребляемого от аккумуляторной батареи (снижение до нуля). Развиваемый крутящий момент синхронной машины в интервале с пятой по восьмую секунду меньше момента сопротивления прокручиванию и момента инерции ротора, вследствие чего происходит снижение частоты вращения со 120 до 90 об/мин.

На рисунке 9 приведены осциллограммы прокрутки двигателя при следующих параметрах:

- время прокрутки – 8 с;
- заданный фазный ток  $I_{f\_ref}$  – 600 А;
- заданное напряжение накачки  $U_{bst\_ref}$  – 100 В;
- заданный ток возбуждения  $I_{exc\_ref}$  – 120 А;
- начальное напряжение аккумуляторной батареи – 60 В;
- момент сопротивления прокручиванию  $M_c$  рассчитан с кинематической вязкостью масла  $\gamma$  при температуре 40 °С;
- темп набора частоты вращения при раскрутке – 25 об/с.

При прокрутке двигателя с более нагретым моторным маслом электрическая машина не выходит из синхронизма и коленчатый вал разгоняется до заданной пусковой частоты вращения даже при сильно пониженном напряжении батареи. Система автоматического управления пускового преобразователя поддерживает плавное регулирование тока,

потребляемого от аккумуляторной батареи, и обеспечивает равномерную раскрутку коленчатого вала дизельного двигателя.

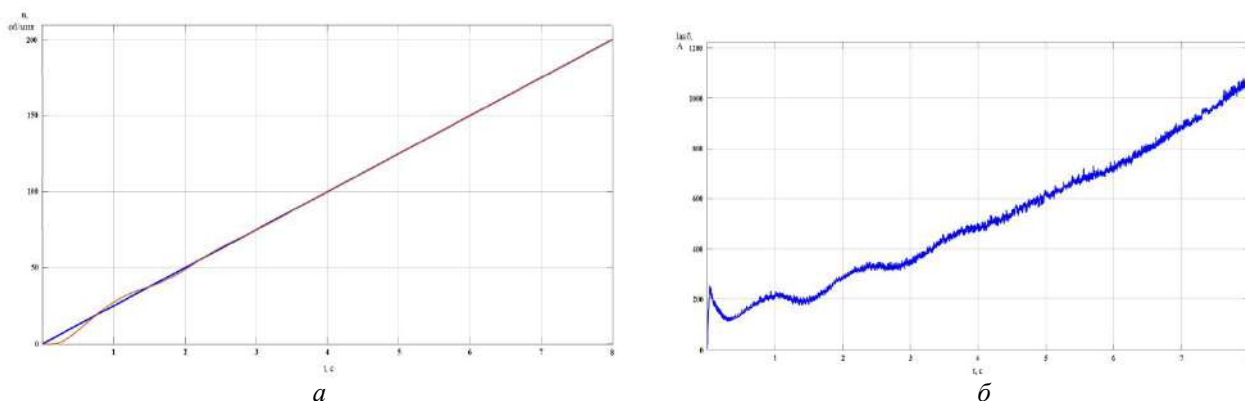


Рисунок 9 – Осциллограммы запуска двигателя при температуре моторного масла, равной 15 °С: заданная и измеренная частоты (а), ток, потребляемый от аккумуляторной батареи (б)

В заключение можно отметить, что разработанная имитационная модель инверторной системы запуска дизельного двигателя тепловоза позволяет осуществить следующее:

- исследовать процессы, протекающие в электрической машине, которая используется для прокрутки коленчатого вала двигателя;
- оценивать состояние аккумуляторной батареи при пуске (уровень разряда);
- контролировать работу всех блоков пускового преобразователя;
- настраивать алгоритмы системы автоматического управления пускового преобразователя;
- имитировать запуски дизельного двигателя при различных заданных параметрах и изменении алгоритмов управления;
- учитывать изменение нагрузки в зависимости от условий запуска.

Верификация модели планируется в рамках дальнейшей исследовательской работы при эксплуатационных испытаниях инверторной системы запуска на тепловозе ЗТЭ28 с установкой специализированного измерительного комплекса для регистрации результатов измерений.

## Список литературы

1. Математическое моделирование в технике / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – Москва : Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с. – Текст : непосредственный.
2. Аюпов, В. В. Математическое моделирование технических систем / В. В. Аюпов. – Пермь : Прокрость, 2017. – 242 с. – Текст : непосредственный.
3. Плешаков, А. А. Математическое моделирование системы инверторного запуска дизель-генератора / А. А. Плешаков, К. С. Перфильев, Ю. В. Бабков. – Текст : непосредственный // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Ташкент : Ташкентский гос. трансп. ун-т, 2024. – С. 316–325. – Текст : непосредственный.
4. Плешаков, А. А. Запуск теплового двигателя от синхронного генератора // ELTRANS-2023. Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта : сборник трудов международного симпозиума (Санкт-Петербург, 31 мая – 2 июня 2023 г.). – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I, 2023. – С. 362–375. – Текст : непосредственный.
5. Аккумуляторы и батареи аккумуляторные никель-кадмиевые с ламельными электродами. Руководство по эксплуатации ЖУКИ.563330.001 РЭ. – Саратов : ОАО «Завод АИТ», 2013. – 23 с. – Текст : непосредственный.

6. Тепловоз магистральный грузовой 3ТЭ28, 2ТЭ28. Руководство по эксплуатации СТНР.661112.004РЭ. Часть 1. Основные параметры и характеристики. – Брянск : ООО «ТМХ Инжиниринг», 2023. – 35 с. – Текст : непосредственный.

7. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В. И. Ленина, 2008. – 298 с. – Текст : непосредственный.

8. Дизельные двигатели для электроагрегатов и электростанций / Б. Е. Поликер, Л. Л. Михальский [и др.]. – Москва : Легион-Автодата, 2006. – 328 с. – Текст : непосредственный.

9. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадыштова [и др.]. – Москва : Техинформ, 1999. – 596 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Zarubin V.S., Krishchenko A.P. ed. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical simulation in engineering]. Moscow, Moscow State University of Technology named after N.E. Bauman Publ., 2003, 496 p. (In Russian).

2. Ayupov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh system* [Mathematical simulation of technical systems: study guide]. Perm, Prokrost Publ., 2017, 242 p. (In Russian).

3. Pleshakov A.A., Perfilyev K.S., Babkov Yu.V. [Mathematical simulation of the inverter start system of a diesel generator]. *Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the Third international scientific and technical conference]. Tashkent, 2024, pp. 316-325. (In Russian).

4. Pleshakov A.A. [Starting a thermal engine by a synchronous generator]. *ELTRANS-2023. Elektrifikaciya i elektricheskaya tyaga: cifrovaya transformaciya zheleznodorozhnogo transporta: sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma* [ELTRANS-2023. Electrification and electric traction: digital transformation of railway transport: proceedings of the XI International Symposium]. St. Petersburg, 2023, pp. 362-375 (In Russian).

5. Nickel-cadmium accumulators and storage batteries with plate electrodes. Operation manual ZhUKI.563330.001 RE]. Saratov, OJSC «Zavod AIT (Independent Current Source Plant)» Publ., 2013, 23 p. (In Russian).

6. Mainline freight diesel locomotive 3TE28, 2TE28. Operation manual STNR.661112.004RE. Part 1. Main parameters and characteristics. Bryansk, LLC «ТМХ Инжиниринг» Publ., 2023, 35 p. (In Russian).

7. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ., 2008, 298 p. (In Russian).

8. Poliker B.E., Mikhalsky L.L. et al. *Dizel'nye dvigateli dlya elektroagregatov i elektrostancij* [Diesel engines for electric units and power plants]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2006, 328 p. (In Russian).

9. Anisimov I.G., Badyshtova K.M. et al. *Topliva, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primenenie : spravochnik* [Fuels, lubricants, technical fluids. Range and application: handbook]. Moscow, Tehinform Publ., 1999, 596 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Плешаков Андрей Александрович**

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

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

Заведующий лабораторией.

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 12-04.

E-mail: plechakov@vnikti.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Pleshakov Andrey Alexandrovich**

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

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of Laboratory.

Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 12-04.

E-mail: plechakov@vnikti.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Плешаков, А. А. Имитационная модель инверторной системы запуска двигателя тепловоза с учетом параметров дизель-генератора / А. А. Плешаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 127 – 139.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pleshakov A.A. Simulation model for the inverter system of diesel locomotive engine starting system taking into account diesel generator parameters. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 127-139. (In Russian).

УДК 621.313.33

**В. В. Харламов, Д. И. Попов, Е. А. Кукарекин**

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

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

**Аннотация.** Если в процессе эксплуатации асинхронные двигатели (АД) будут работать напрямую от сети, то при проведении их испытаний они должны получать питание от источника синусоидального напряжения 50 Гц. В ходе исследований в области испытания асинхронных нерегулируемых двигателей методом взаимной нагрузки было предложено в качестве нагрузочной машины использовать генераторы постоянного тока (ГПТ). В одной из схем, построенных по такому принципу, в установившемся режиме ГПТ и полупроводниковый преобразователь обеспечивают рекуперацию энергии испытуемого двигателя в питающую сеть.

Для изучения физических процессов и обеспечения возможности проектирования такого испытательного стенда создана имитационная модель, представленная в данной статье. Для построения модели применяется программный пакет Matlab/Simulink. В нем присутствуют библиотеки электротехнических и механических блоков, а также множество инструментов для проведения научно-технических исследований. В статье приводится математическое описание блоков электрических машин из библиотеки Simscape Electrical. Описана структура модели и функции, которые выполняют ее элементы. Проведено моделирование и подробное описание рассматриваемого режима работы стенда. На временных диаграммах отображены переходные процессы в испытуемой и нагрузочной машинах. Представлены результаты для установившегося режима, выполнено их сравнение с номинальными параметрами асинхронного двигателя и генератора постоянного тока. Проведен гармонический анализ кривых тока тиристорного преобразователя со стороны сети. Результаты данного анализа показали присутствие высших гармоник.

Модель позволяет исследовать динамические и статические режимы работы оборудования испытательного стенда. Представленные результаты могут использоваться при дальнейших исследованиях в данной области и детальном проектировании стендов.

**Ключевые слова:** разработка, система испытаний, нерегулируемые асинхронные двигатели, метод взаимной нагрузки, имитационное моделирование.

**Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Evgeny A. Kukarekin**

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

## SIMULATION MODEL OF A TEST BENCH FOR UNREGULATED ASYNCHRONOUS MOTORS USING THE MUTUAL LOAD METHOD

**Abstract.** Asynchronous motors, which operate on a 50 Hz network during operation and must be connected directly to the network during testing. In the course of research in the field of testing asynchronous unregulated motors by the method of mutual loading, it was proposed to use direct current generators as a loading machine. In one of the circuits built on this principle, in steady-state mode, the direct current generators and a semiconductor converter provide energy recovery of the tested engine into the supply network.

To study the physical processes and ensure the possibility of designing such a test bench, a simulation model has been created, presented in this article. The Matlab/Simulink software package is used to build the model. It contains libraries of electrical and mechanical units. There are many tools for conducting scientific and technical research. The article provides a mathematical description of the blocks of electrical machines from the Simscape Electrical library. The structure of the model and the functions performed by its elements are described. The modeling and detailed description of the considered operation mode of the stand have been carried out. The time diagrams show the transients in the test and load machines. The results for the steady-state mode are presented, and their comparison with the nominal

parameters of an asynchronous motor and a DC generator is performed. A harmonic analysis of the current curves of the thyristor converter network was carried out, which showed the presence of higher harmonics.

The model allows you to explore the dynamic and static operating modes of the test bench equipment. The presented results can be used for further research in this field and detailed design of stands.

**Keywords:** development, test system, unregulated induction motors, mutual load method, simulation modeling.

Нерегулируемые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором имеют широкую область применения. В процессе эксплуатации данных машин возникает необходимость проведения их внепланового и периодического технического обслуживания, ремонта. По окончании ремонта проводят испытания, целью которых является установление соответствия ряда параметров асинхронного двигателя требуемым значениям.

Одними из наиболее эффективных систем испытаний электрических машин являются системы, реализующие метод взаимной нагрузки, имеющий ряд преимуществ по сравнению со своими аналогами [1]. Анализ существующих схем испытаний АД методом взаимной нагрузки показал, что схемы с применением нагрузочного ГПТ предназначены исключительно для испытания регулируемых АД [2]. Авторами статьи получен патент на техническое решение, в котором ГПТ позволяет нагружать нерегулируемый асинхронный двигатель (рисунок 1) [3]. В таком стенде генератор подключается к сети через выпрямитель – инверторный преобразователь (ВИП), что позволяет рекуперировать энергию в сеть. Помимо этого ВИП позволяет плавно регулировать напряжение на якорной обмотке машины постоянного тока и обеспечивать его плавный пуск с дальнейшим подключением асинхронного двигателя к сети.

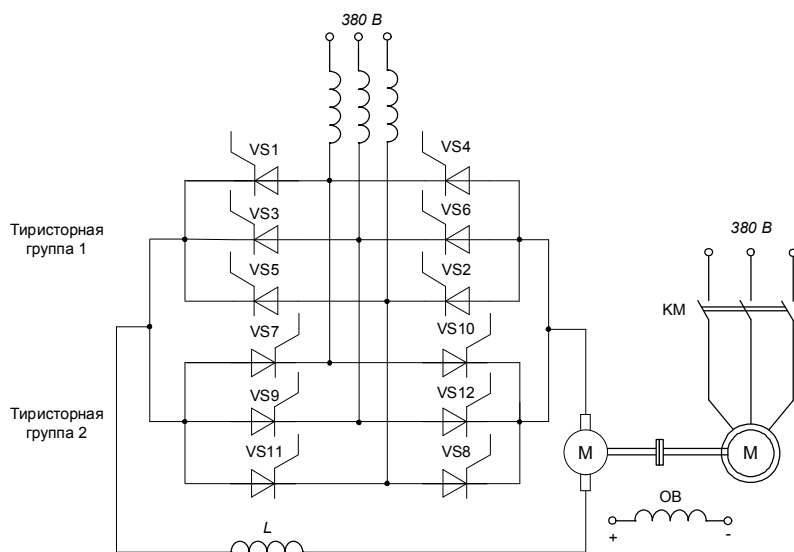


Рисунок 1 – Электрическая схема стенда для испытаний нерегулируемых АД с нагрузочным ГПТ

Для производства и промышленного использования такого устройства необходимо выполнить комплекс организационно-технических мероприятий: эскизное, техническое и рабочее проектирование, изготовление опытного образца, испытания и т. д., причем в условиях ограниченных ресурсов. Моделирование занимает одно из центральных мест в проектировании. Модель обеспечивает адекватное отображение свойств объекта, устраняет проблемы, связанные с измерениями на реальных объектах, обеспечивает воспроизводимость результатов. При этом имитационная модель обладает большей наглядностью по сравнению с математической, и с этой точки зрения в некоторых случаях является более удобным инструментом анализа.

Известные математические модели процесса испытаний описывают физические процессы, происходящие в двигателях, преобразователях частоты, неуправляемых выпрямителях, но не рассматривают представленный выше стенд [4, 5]. В связи с этим в

программном продукте Matlab разработана имитационная модель представленного стенда (см. рисунок 1). В состав Matlab включена подсистема Simulink, являющаяся графической средой имитационного моделирования, симуляции и анализа систем. Для создания виртуальной модели применялась библиотека Simscape Electrical. Она включает в себя необходимые электротехнические блоки.

Далее представлено математическое описание блоков электрических машин, используемых в модели [6].

Электромагнитные процессы в модели машины постоянного тока (DC Machine) описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a; \\ u_f = L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f, \end{cases} \quad (1)$$

где  $e_a = k_E \omega$ ;

$$k_E = L_{af} i_f;$$

$u_a, i_a, e_a$  – напряжение, ток и противоЭДС якоря;

$u_f, i_f$  – напряжение и ток возбуждения;

$R_a, L_a$  – активное сопротивление и индуктивность цепи якоря;

$R_f, L_f, L_{af}$  – активное сопротивление, индуктивность цепи возбуждения, взаимная индуктивность между цепью якоря и цепью возбуждения.

Уравнение движения машины постоянного тока имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_E - T_L - B_m \omega - T_f, \quad (2)$$

где  $T_e = k_E i_a$  – электромагнитный момент;

$T_L, \omega, i_a$  – угловая скорость, момент нагрузки, ток якоря;

$J, B_m, T_f$  – момент инерции ротора, коэффициент вязкого трения, момент сухого трения.

Электромагнитные процессы в модели асинхронной машины (Asynchronous Machine SI Units) описываются следующей системой уравнений, которая соответствует T-образной схеме замещения:

$$\begin{cases} u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega \Psi_{ds}; \\ u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + \omega \Psi_{qs}; \\ u'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\Psi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{dr}; \\ u'_{qs} = R'_r i'_{qs} + \frac{d\Psi'_{qs}}{dt} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{qr}; \\ T_e = 1,5(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $u_{ds}, i_{ds}, u_{qs}, i_{qs}$  – проекция векторов напряжения и тока статора на соответствующие оси;

$i'_{dr}, i'_{qr}$  – проекция векторов тока ротора на соответствующие оси;

$R_s, L_{ls}, R_r, L'_{lr}$  – активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора и ротора;

$L_s, L'_r, L_m$  – полные индуктивности статора, ротора и индуктивность цепи намагничивания;

$\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi'_{dr}, \Psi'_{qr}$  – проекции потокосцепления статора и ротора на оси  $d$  и  $q$ ;

$\omega, \omega_r$  – угловая частота напряжения питания и электрическая угловая скорость вращения ротора.

Все электрические переменные и параметры в системе уравнений (3) приводятся к статору и двухфазной системе координат  $d$  и  $q$ .

Проекция потокосцепления статора и ротора на оси  $d$  и  $q$  определяются по выражениям:

$$\Psi_{ds} = L_s i_{qs} + L_m i'_{dr}, \Psi_{qs} = L_s i_{ds} + L_m i'_{qr}, \Psi'_{dr} = L'_r i_{dr} + L_m i_{ds}, \Psi'_{qr} = L'_r i_{qr} + L_m i_{qs}.$$

Полные индуктивности статора и ротора определяются по выражениям:

$$L_s = L_{ls} + L_m, L'_r = L'_{lr} + L_m.$$

Уравнение движения асинхронной машины:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m); \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\omega_m, \theta_m$  – угловая частота вращения ротора, угловое положение ротора;

$T_m, H, F$  – механический момент на валу, суммарная инерционная постоянная машины и нагрузки, суммарный коэффициент вязкого трения.

Параметры схемы замещения асинхронной машины (5AM112M5) и машины постоянного тока (2ПФ132L) определены по паспортным данным в соответствии с методикой, представленной в работе [7]. Номинальная мощность рассматриваемых машин составляет 5,5 кВт. Расчеты параметров преобразователя и выбор токоограничивающего реактора, сглаживающего фильтра и тиристоров проведены по рекомендациям, приведенным в источнике [8]. Параметры этих элементов учтены в модели.

В разработанной модели (рисунок 2) используются блоки идеальных источников напряжения Three-Phase Source.

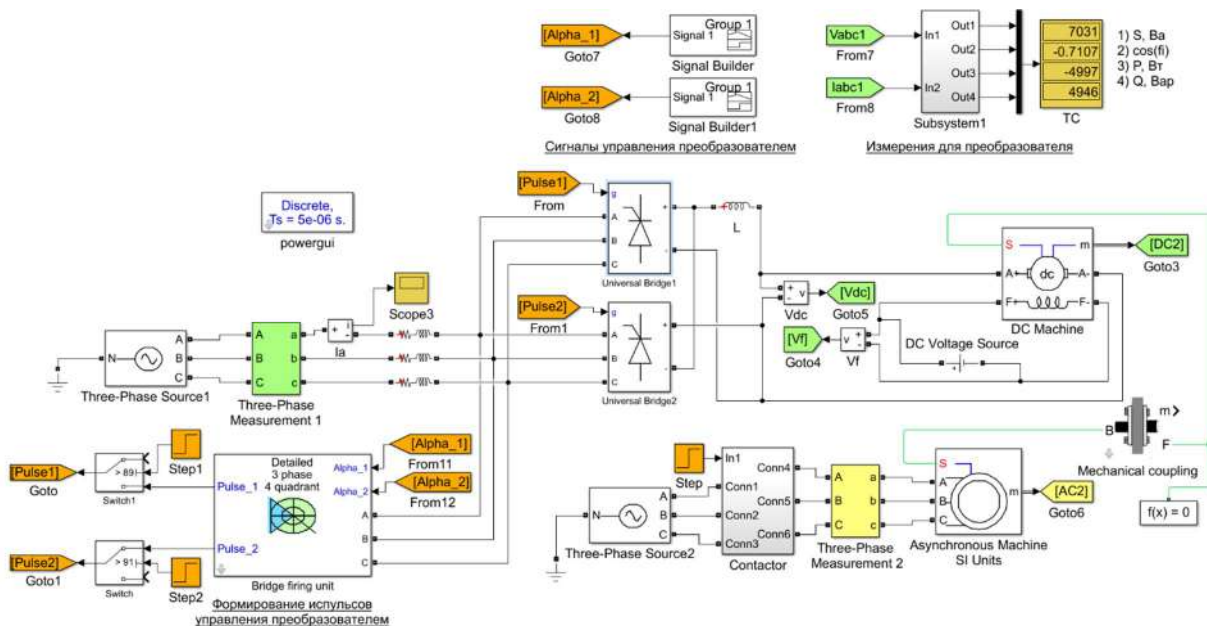


Рисунок 2 – Имитационная модель испытаний методом взаимной нагрузки

Для измерений в цепях переменного напряжения используется блок Three-Phase Measurement. Токоограничивающий реактор и сглаживающий фильтр представлены блоками Series RLC Branch. Управляемые выпрямители, состоящие из тиристорных групп 1 и 2, моделируются блоками Universal Bridge. Трехфазный контактор состоит из блоков Ideal Switch. Электрические машины представлены блоками DC Machine и Asynchronous Machine SI Units. Блок DC Voltage Source – это источник идеального напряжения постоянного тока. Импульсы управления тиристорами формируются в библиотечном блоке Bridge firing unit по заданным значениям углов управления Alpha\_1 и Alpha\_2, которые формируются блоками Signal Builder. Вывод результатов моделирования осуществляется на осциллографы Scope и виртуальные дисплеи TC, DC Mach, Asynchronous Mach. В модели присутствуют измерительные блоки и блоки математических операций, часть из них скрыты в подмоделях Subsystem1, 2, 3 (рисунок 3).

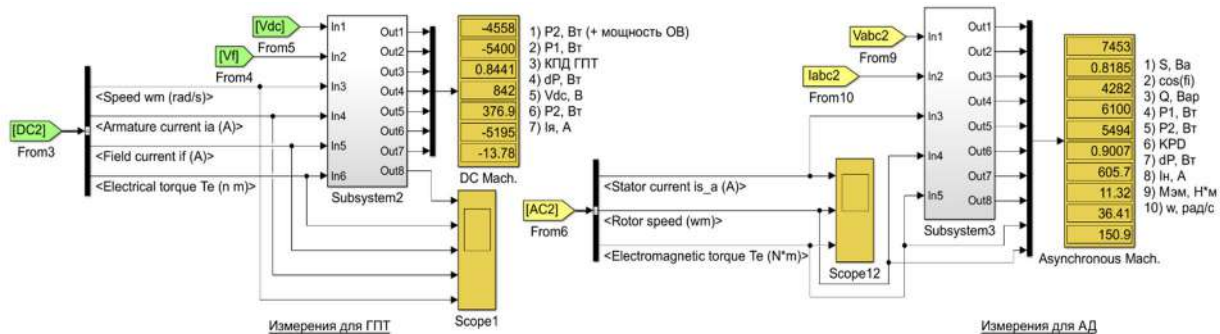


Рисунок 3 – Подсистемы измерений в модели

Гармонический состав тока на выходе преобразователя фазы А (блоки Ia – Scope3) рассчитывается с помощью встроенного в блок powergui инструмента FFT Analysis. Соединительная муфта моделируется блоком Mechanical coupling, который состоит из блоков вращательного движения Rotational Spring и Rotational Damper.

Моделирование проводилось с дискретным шагом  $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$  с (рисунки 4, 5).

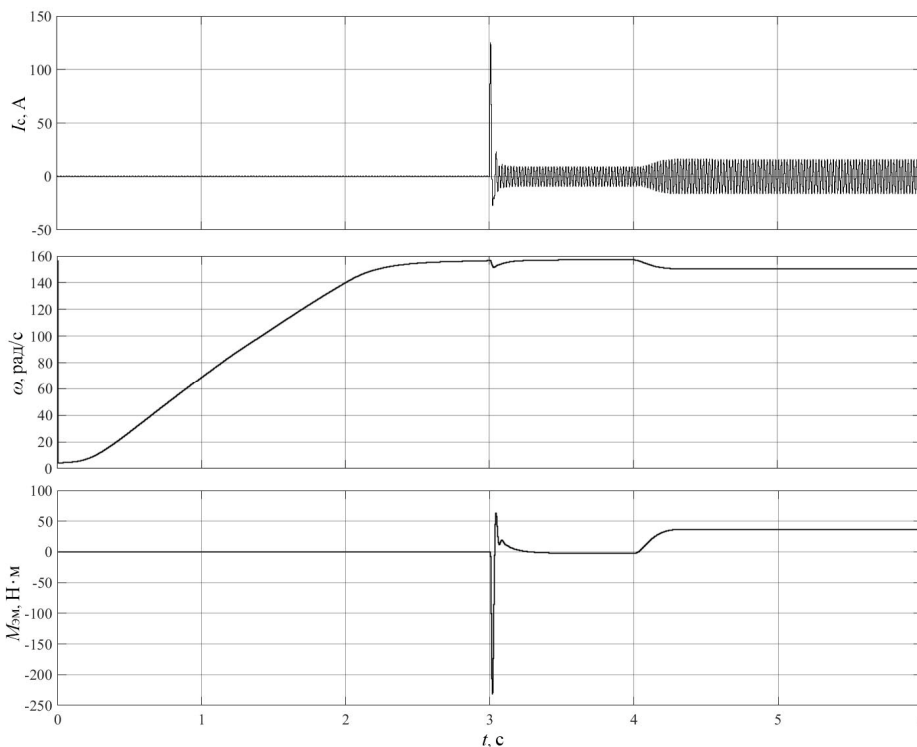


Рисунок 4 – Временные диаграммы тока статора, частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД, полученные в результате имитационного моделирования

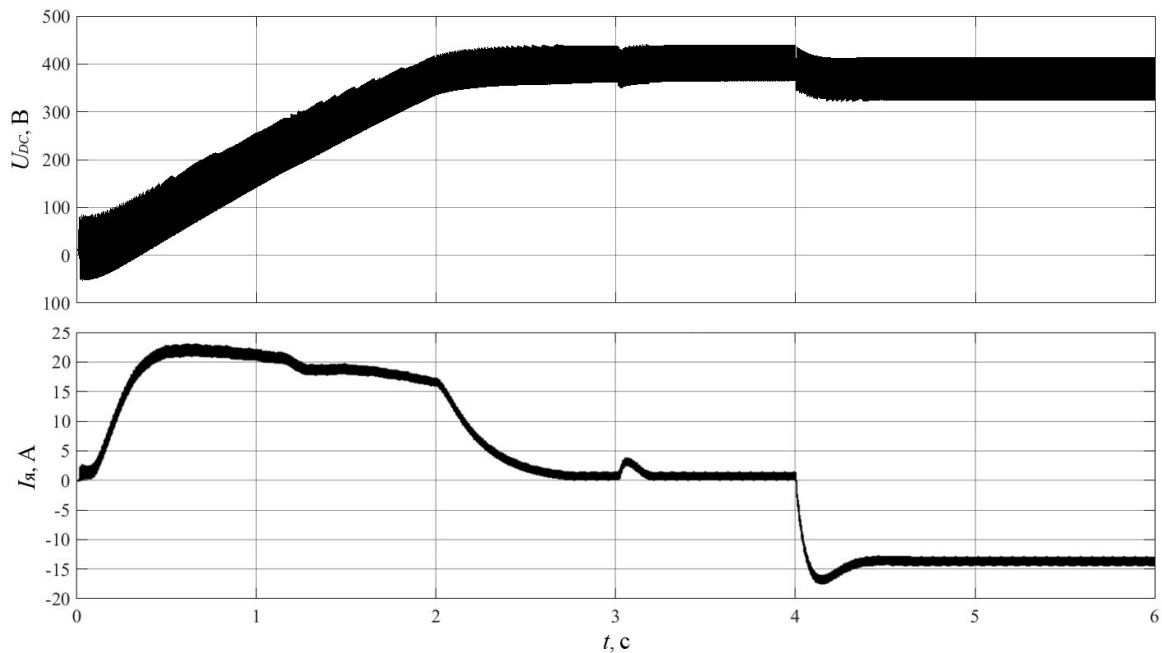


Рисунок 5 – Временные диаграммы напряжения и тока якоря ГПТ

В начальный момент времени происходит включение машины постоянного тока. Ее обмотка возбуждения получает напряжение от источников постоянного напряжения. Якорная обмотка получает питание от реверсивного трехфазного тиристорного выпрямителя, который работает в раздельном режиме. Вал асинхронного двигателя и генератора имеет механическую связь. Асинхронный двигатель контактором отключен от отдельного источника переменного трехфазного напряжения. В промежутке 0 – 2 с происходит изменение угла управления  $\alpha_1$  в тиристорной группе № 1 (от  $90^\circ$  до  $37^\circ$ ), что приводит к плавному пуску машины постоянного тока до номинальной частоты вращения АД в промежутке 0 – 3 с. На тиристорную группу 2 не поступают сигналы управления.

При достижении частоты вращения значения  $\omega_1 = 157$  рад/с (синхронной частоты АД) контактор подключает обмотку статора АД к трехфазной сети. После завершения переходного процесса изменяется полярность и снижается напряжение, подаваемое на якорную обмотку путем задания угла управления  $\alpha_2 = 136^\circ$  в тиристорной группе № 2, что обеспечивает его переход в генераторный режим. На тиристорную группу № 1 перестают поступать импульсы управления. Схема начинает работать в установившемся режиме, его параметры отображаются в блоках TC, DC Mach., Asynchronous Mach. (см. рисунки 2, 3), частично эти параметры приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты моделирования для ГПТ

$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	КПД	$\Delta P$ , Вт	$I_a$ , А
-5400	-4558	0,84	842	-13,78

Таблица 2 – Результаты моделирования для АД

$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	КПД	$\cos \varphi$	$\Delta P$ , Вт	$I_c$ , А	$M_{эм}$ , Н·м	$\omega$ , рад/с
6100	5494	0,9	0,82	609	11,32	36,41	150,9

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что стенд обеспечивает необходимый режим работы. Преобразователь регулирует напряжение на якорной обмотке генератора, что приводит к плавному пуску асинхронного двигателя без бросков тока и последующую работу схемы в режиме рекуперации. Представленные данные говорят о том, что АД работает в номинальном режиме. Номинальные значения тока статора  $I_{c\text{ ном}} = 11,7$  (А),

электромагнитного момента  $M_{эм ном} = 37,2$  (Н·м), угловой частоты вращения ротора  $\omega_1 = 157$  (рад/с), полезной мощности  $P_{2 ном} = 5,5$  (кВт), КПД  $\eta_{ном} = 86$  (%) и коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ном} = 0,83$  близки к расчетным (см. таблицу 2). Машина постоянного тока работает при пониженном напряжении якоря. Ее частота вращения, ток якоря, КПД отличаются от номинальных.

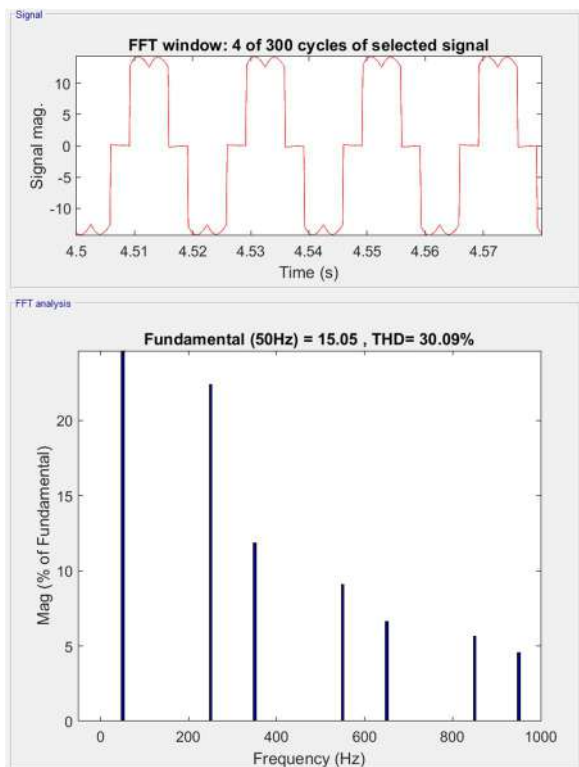


Рисунок 6 – Гармонический состав тока фазы преобразователя на стороне сети

лируемых асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки в динамических и статических режимах работы. Модель дает возможность применять ее при проектировании соответствующих систем испытания, определять параметры оборудования, проверять возможные алгоритмы работы, разрабатывать систему управления. Модель позволяет определять значения потребляемой и вырабатываемой машинами мощности, КПД, коэффициента мощности и коэффициентов искажения синусоидальности напряжения на входе преобразователя и др. Эти данные позволяют выполнять анализ степени влияния параметров силового оборудования и режимов работы на качество функционирования и энергетическую эффективность стенда. При этом данная имитационная модель позволяет исследовать как статические, так и динамические режимы работы.

### Список литературы

1. Коварский, Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. Харламов, В. В. Разработка электротехнического комплекса для испытаний нерегулируемых асинхронных двигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Е. А. Кукарекин. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23) : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 16 ноября 2023 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 105–111. – EDN SWFGMW.

3. Патент на полезную модель № 219268 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания нерегулируемых асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки : № 2023112373 : заявлено 11.05.2023 : опубликовано 07.07.2023 / Харламов В. В., Попов Д. И., Кукарекин Е. А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения». – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный. – EDN LFUXPL.

4. Попов, Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 79–84. – DOI 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. – EDN XZBIPZ.

5. Попов, Д. И. Разработка научных основ построения электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Попов Денис Игоревич; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2022. – 365 с. – Текст : непосредственный.

6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс; Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 288 с. – Текст : непосредственный.

7. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины : лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. – Санкт-Петербург : Корона принт, 2003. – 256 с. – Текст : непосредственный.

8. Удут, Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока / Л. С. Удут, Н. В. Кояин, О. П. Мальцева. – Томск : Томский политехн. ун-т, 2007. – 164 с. – Текст : непосредственный.

9. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. – Москва : Академия, 2005. – 480 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. Kovarskii E.M., Janko Yu.I. *Ispytanie elektricheskikh mashin* [Testing of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 320 p. (In Russian).

2. Kharlamov V.V., Popov D.I., Kukarekin E.A. [Development of an electrical complex for testing unregulated asynchronous motors]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: Materialy VI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Technological support for the repair and improvement of the dynamic qualities of railway rolling stock: Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical conference with international participation]. Omsk, 2023, pp. 105-111. EDN SWFGMW. (In Russian).

3. Kharlamov V.V., Popov D.I., Kukarekin E.A. *Patent RU 219268 U1*, 07.07.2023. EDN LFUXPL.

4. Popov D.I. Mathematical modeling of physical processes in test complexes of electric machines. *Omskij nauchnyj vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 4 (160), pp. 79-84. DOI 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. EDN XZBIPZ. (In Russian).

5. Popov D.I. *Razrabotka nauchnykh osnov postroeniia elektrotekhnicheskikh kompleksov dlia ispytaniia tiagovykh elektricheskikh mashin metodom vzaimnoi nagruzki* (Development of scientific foundations for the construction of electrotechnical complexes for testing traction electric machines by the method of mutual loading). Doctor's of Sciences in Engineering thesis, Omsk, OSTU, 2022, 365 p. (In Russian).

6. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ.; St. Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian).

7. Herman-Galkin S.G., Kardonov G.A. *Elektricheskie mashiny: laboratornye raboty na PK* [Electric machines: laboratory work on a PC]. St. Petersburg, Korona print Publ., 2003, 256 p. (In Russian).

8. Udut L.S., Koyain N.V., Maltseva O.P. *Proektirovanie i issledovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov. Ch. 4. Tiristornyye preobrazovateli dlya elektroprivodov postoyannogo toka* [Design and research of automated electric drives. Part 4. Thyristor converters for DC electric drives]. Tomsk Polytechnic University Publ., 2007, 164 p. (In Russian).

9. Katsman M.M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electric machines]. Academy Publ., 2005, 480 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

### Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: popovomsk@yandex.ru

### Кукарекин Евгений Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (913) 680-37-05.

E-mail: saray-garaj@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Имитационная модель стенда для испытаний нерегулируемых асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Е. А. Кукарекин – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 4 (60). – С. 139 – 147.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kharlamov Viktor Vasil'evich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of department of «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: emoe@omgups.ru.

### Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, docent, professor of department of «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: popovomsk@yandex.ru

### Kukarekin Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of department of «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (913) 680-37-05.

E-mail: saray-garaj@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V.V., Popov D.I., Kukarekin E.A. Simulation model of a test bench for unregulated asynchronous motors using the mutual load method. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 4 (60), pp. 139-147. (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»

#### В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи (образец прилагается).
6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).

В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-).

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как  $\cos$ ,  $\sin$ ,  $\max$ ,  $\min$ , – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить;

инициалы и фамилии всегда должны находиться на одной и той же строке;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде;

рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках;

список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018;

список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом;

при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией журнала. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

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»

№ 4 (60) 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 26.12.2024.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 28.12.2024.

