

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(37)

2019

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. **Бокарев Сергей Александрович** – зам. профессора кафедры «Мосты» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Дёмин Юрий Васильевич** – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Каргапольцев Сергей Константинович** – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. **Лебедев Виталий Матвеевич** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. **Сидоров Олег Алексеевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
17. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТаШИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. **Харламов Виктор Васильевич** – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

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

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Буйновос А. П., Мишин Я. А. Расчет распределения нагрузки между телами качения в роликовом подшипнике тягового двигателя электровоза 2
- Голубков А. С., Сидоров О. А., Филиппов В. М. Повышение эффективности систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения 9
- Мазнев А. С., Киселев А. А. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока 17
- Мануилов Н. И. Анализ изменения давления в главных резервуарах локомотива на основе результатов поездных испытаний 27
- Устинов Р. И., Мельниченко О. В. Разработка способа оценки образования короткого замыкания в силовых цепях инвертора электровоза 35
- Харламов В. В., Шкоудун П. К., Галеев А. Д. Диагностирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя магистральных локомотивов 44
- Черемисин В. Т., Никонов А. В. Анализ потерь мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов с учетом несинусоидальности напряжения и пути их снижения 54

Транспортная энергетика

- Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. Методика дистанционного диагностирования подвесных фарфоровых изоляторов контактной сети постоянного тока 64
- Малиновский Ю. Г. Использование жидких нефтесодержащих отходов вагоноремонтных предприятий для генерации тепловой энергии 72
- Москалев Ю. В. Определение диапазонов регулирования токов компенсирующего устройства для снижения несимметрии тяговых нагрузок и повышения коэффициента мощности тяговой подстанции переменного тока железных дорог 81
- Уткина А. В. Автоматизированная дренажная защита подземных сооружений тяговой сети постоянного тока 92
- Ратушняк В. С., Ратушняк В. С., Ильин Е. С., Вахрушева О. Ю. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП 102

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Петров В. В., Петров К. С. Повышение помехоустойчивости цифровых фазоизмерительных устройств для исследования электродинамических процессов на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта 112

Путь и искусственные сооружения

- Дубровская Т. А. Обоснование параметров реконструкции железной дороги для введения скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации 122

Организация производства на транспорте

- Ларина И. В., Ларин А. Н. Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик 130
- Шендалев А. Н., Шендалева О. А. Алгоритм оценки уровня рисков логистической инфраструктуры 141

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.4.023

А. П. Буйносов, Я. А. Мишин

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

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ В РОЛИКОВОМ ПОДШИПНИКЕ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

***Аннотация.** В статье предложена методика расчета распределения нагрузки между телами качения роликового подшипника тягового двигателя, позволяющая учитывать величину радиального зазора в подшипнике и радиальное перемещение внутреннего кольца относительно наружного. Для определения нагрузки, воспринимаемой наиболее нагруженным роликом, предложено решать уравнение равновесия для внутреннего кольца с помощью метода простых итераций. Реализация метода осуществлена в программном комплексе Matlab. С помощью предложенной методики было рассчитано распределение нагрузки между роликами в тяговом двигателе электровоза ВЛ11К. Для определения нагрузки, действующей на подшипник, был выбран участок Сарга – Сабик, имеющий горный профиль пути.*

***Ключевые слова:** электровоз, тяговый двигатель, подшипник, ролик, качение, тело, нагрузка, распределение, расчет.*

Alexander P. Buinosov, Yaroslav A. Mishin

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

CALCULATION OF DISTRIBUTION LOAD BETWEEN ROLLING BODIES IN THE ROLLER BEARING OF THE TRACTION MOTOR

***Аннотация:** The article proposes a method of calculation the load between the rolling bodies of the swinging bearings and the bearings of the traction motor, which makes it possible to have the value of the radial clearance in the bearing, as well as the radial movement of the inner rings relative to the outer one. To determine the load perceived by the most loaded rollers, a solution of the equilibrium equation for internal elements is proposed using simple iterations. The implementation of the method is implemented in the Matlab software package. Using the proposed method, the load distribution between the rollers in the traction motor of the VL11K electric locomotive was calculated. To determine the load acting on the bearing, the Sarga-Subic section was selected, which has a mountain profile.*

***Keywords:** electric locomotive, traction motor, bearing, roller, rolling, body, load, distribution, calculation.*

В подшипниковых узлах тяговых двигателей электровозов устанавливают роликовые подшипники. В процессе эксплуатации на подшипники тяговых двигателей в радиальном направлении действует сила, которая складывается из постоянной, переменной и динамических нагрузок.

Постоянная нагрузка определяется весом тягового двигателя, переменная нагрузка зависит от тягового усилия и силы магнитного притяжения. Динамические составляющие нагрузки зависят от вертикальных и горизонтальных (вдоль оси пути) ускорений тягового двигателя, от дисбаланса якоря, от неточности изготовления, износа зубчатой передачи и угловых ускорений колесной пары относительно якоря.

Моторно-якорные подшипники тяговых двигателей выходят из строя в несколько раз быстрее расчетного срока службы [1]. Преждевременный выход из строя подшипников происходит из-за усталостного разрушения элементов качения или дорожек качения внутреннего или наружного кольца [2, 3].

В настоящее время в общепринятых методиках расчета долговечности подшипников тяговых двигателей определение ресурса ведется без учета распределения нагрузки между телами качения и без учета величины радиального зазора.

При рассмотрении подшипника как системы, к которой прикладывается радиальная нагрузка, внутреннее кольцо подшипника и конечное число тел качения, на которые оно опирается, представляет собой статически неопределимую систему. Объясняется это тем, что

даже при обычно допускаемых предположениях установить связь между внешней нагрузкой и упругими перемещениями нелегко.

Впервые задача распределения нагрузки между телами качения в подшипнике качения была решена Р. Штрибеком [4]. При решении принимается ряд допущений:

- радиальный зазор в подшипнике отсутствует;
- учитываются только контактные деформации.

На основании решения задачи им была предложена формула для определения нагрузки на наиболее нагруженное тело качения

$$P_{\max} = \frac{K \cdot Q_r}{z}, \quad (1)$$

где P_{\max} – нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным телом качения, Н;

z – количество роликов в подшипнике, шт.;

Q_r – радиальная нагрузка, действующая на подшипник, Н.

Как отмечалось выше, формула (1) действительна только для подшипника с нулевым зазором. В практических расчетах влияние радиального зазора обычно учитывается через поправочный коэффициент K путем его изменения от 4,06 до 5.

Описанные в работах [5, 6] исследования показали, что принятие коэффициента K в интервале от 4,06 до 5 не всегда допустимо. Значения коэффициента можно принимать только для некоторых конкретных радиальных зазоров. Это объясняется изменением зазора после его монтажа и перепадом температуры между элементами подшипника.

Влияние радиального зазора на распределение нагрузки между телами качения подшипника можно учитывать через условие равновесия сил для внутреннего кольца.

Для роликового подшипника (рисунок 2), находящегося под нагрузкой Q_r , запишем условие равновесия сил [7]:

$$Q_r = \sum_{\psi=0}^{\psi=\pm\psi_l} P_{\psi} \cdot \cos \psi, \quad (2)$$

где P_{ψ} – нагрузка, действующая на ролик в положении ψ , Н;

ψ – угловое расстояние между роликами, °.

Выражение (2) можно записать в интегральной форме:

$$Q_r(\varepsilon) = z \cdot P_{\max} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\psi_l}^{+\psi_l} \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 + \cos \psi) \right]^{1.11} \cos \psi \, d\psi, \quad (3)$$

или

$$Q_r = z \cdot P_{\max} \cdot J_r(\varepsilon), \quad (4)$$

где P_{\max} – нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным роликом, Н;

z – количество роликов в подшипнике, шт.;

$J_r(\varepsilon)$ – интеграл радиальной нагрузки;

ε – коэффициент распределения нагрузки.

Нагрузка на наиболее нагруженный ролик определяется по уравнению:

$$P_{\max} = K_n \cdot \left(\delta_r - \frac{1}{2} \cdot G_r \right)^{1.11}, \quad (5)$$

где δ_r – перемещение внутреннего кольца относительно наружного в радиальном направлении, мм;

G_r – радиальный зазор, мм;

K_n – коэффициент, характеризующий кривизну соприкасающихся деталей подшипника в местах контакта и упругие свойства материала, Н/мм^{1.11}.

Для роликового подшипника коэффициент K_n определяется по формуле:

$$K_n = \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{K_l}\right)^{1/1.11} + \left(\frac{1}{K_l}\right)^{1/1.11}} \right]^{1.11}, \quad (6)$$

$$K_l = 7,86 \cdot 10^4 l^{8/9}, \quad (7)$$

где l – рабочая длина ролика, мм.

Коэффициент распределения нагрузки определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{G_r}{2\delta_r} \right). \quad (8)$$

Анализируя составляющие выражения (8), можно увидеть, что в коэффициент распределения нагрузки входит радиальный зазор.

С учетом всех составляющих формулы (4) запишем условие равновесия в виде:

$$Q_r = z \cdot K_n \cdot \left(\delta_r - \frac{1}{2} \cdot G_r \right)^{1.11} \cdot J_r(\varepsilon). \quad (9)$$

Основная задача расчета состоит в определении распределения радиальной нагрузки между роликами при разном значении радиального зазора, поэтому составляющие формулы (9), такие как Q_r , z , K_n и G_r , известны, тогда представим формулу (9) относительно известных составляющих:

$$\frac{Q_r}{z \cdot K_n} = \left(\delta_r - \frac{1}{2} \cdot G_r \right)^{1.11} \cdot J_r(\varepsilon). \quad (10)$$

Из выражения (8) определим перемещение внутреннего кольца относительно наружного в радиальном направлении:

$$\delta_r = \frac{G_r}{4 \cdot (0,5 - \varepsilon)}. \quad (11)$$

Угол зоны нагружения определяется по выражению:

$$\psi_l = \arccos(1 - 2 \cdot \varepsilon). \quad (12)$$

Так как известны Q_r , z , K и G_r , то в формулы (10) и (11) введем следующие обозначения:

$$\frac{1}{2} \cdot G_r = A, \quad \frac{G_r}{4} = B \quad \text{и} \quad \frac{Q_r}{z \cdot K_n} = S.$$

С учетом указанных обозначений уравнения равновесия и формула (11) примут вид:

$$\begin{cases} S = (\delta_r - A)^{1.11} \cdot J_r(\varepsilon) \\ \delta_r = \frac{B}{(0,5 - \varepsilon)} \end{cases}. \quad (13)$$

Решить полученные уравнения можно двумя методами – методом проб и ошибок или методом итерации. Использование метода проб и ошибок ограничено и применяется для ре-

шения задач средней сложности (более 20 – 30 проб и ошибок) и практически невозможно решить сложные задачи (более 1000 проб и ошибок). Поэтому для решения системы уравнений (13) применим метод простой итерации. Суть метода заключается в последовательном поиске корня уравнения с заданной точностью [8].

На основании решения уравнения равновесия для разной величины радиальных зазоров определяются значения δ_r , перемещение внутреннего кольца относительно наружного кольца и рассчитываются коэффициенты распределения нагрузки.

Для определения количества роликов, воспринимающих радиальную нагрузку, и распределения ее между роликами находим нагрузку на наиболее нагруженный ролик по формуле:

$$P_{\max} = \frac{Q_r}{z \cdot J_r(\varepsilon)}. \quad (14)$$

Рассчитываем нагрузку на ролик, находящийся в положении ψ , по формуле:

$$P_{\psi} = P_{\max} \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \psi) \right)^{1.11}. \quad (15)$$

В качестве исследуемого объекта был выбран подшипник марки 42330ЛМ, которые устанавливают в тяговые двигатели электровозов ВЛ11К. Величина радиального зазора принималась в соответствии с инструкцией [9]. Нагрузку, действующую на подшипники, определяли по методике, описанной в работах [10 – 12]. Для определения режима работы двигателя был выбран расчетный участок Сарга – Сабик на Свердловской железной дороге, имеющий горный профиль пути.

Приведенное уравнение (13) решалось итерационным методом, реализованным в программном комплексе *Matlab*. На основе результатов расчетов для каждого значения радиального зазора была определена нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным роликом (рисунок 1).

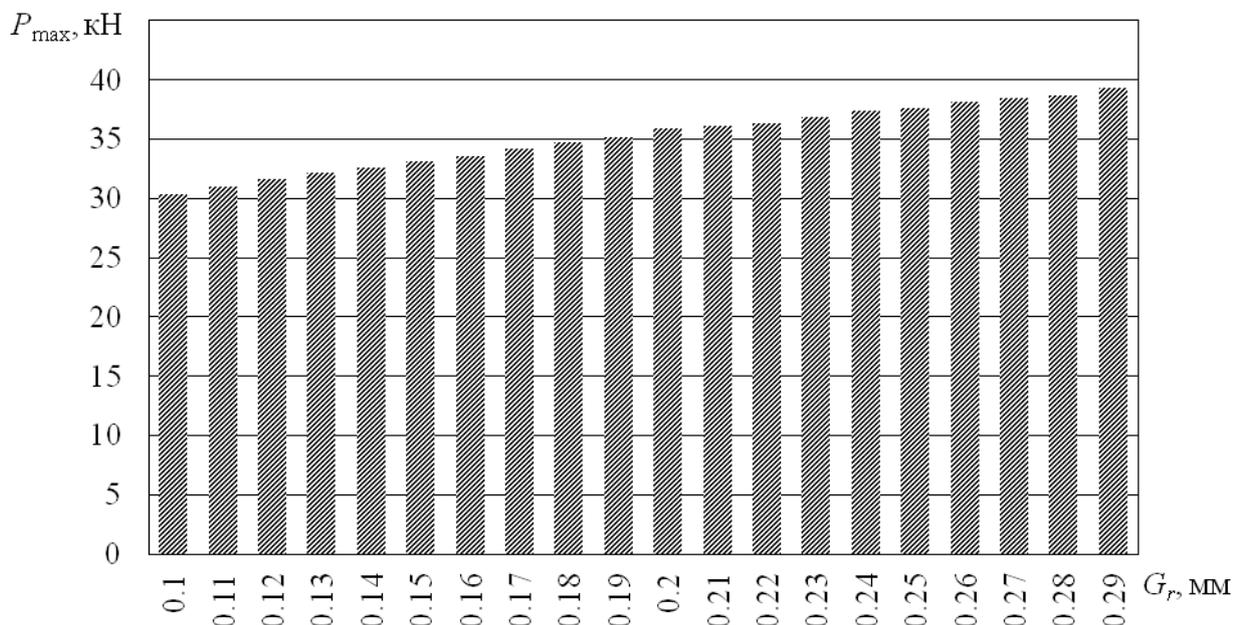


Рисунок 1 – Зависимость нагрузки, воспринимаемой наиболее нагруженным роликом, при разных значениях радиального зазора

На рисунке 1 приведены зависимости нагрузки, воспринимаемой наиболее нагруженным роликом, от радиального зазора. Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением

радиального зазора нагрузка на ролик возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением радиального зазора происходит уменьшение зоны нагрузки ψ_1 (см. рисунок 2).

Проведенные расчеты показали, что радиальная нагрузка, действующая на подшипник, воспринимается только тремя роликами. На рисунке 2 приведена схема распределения нагрузки между роликами подшипника.

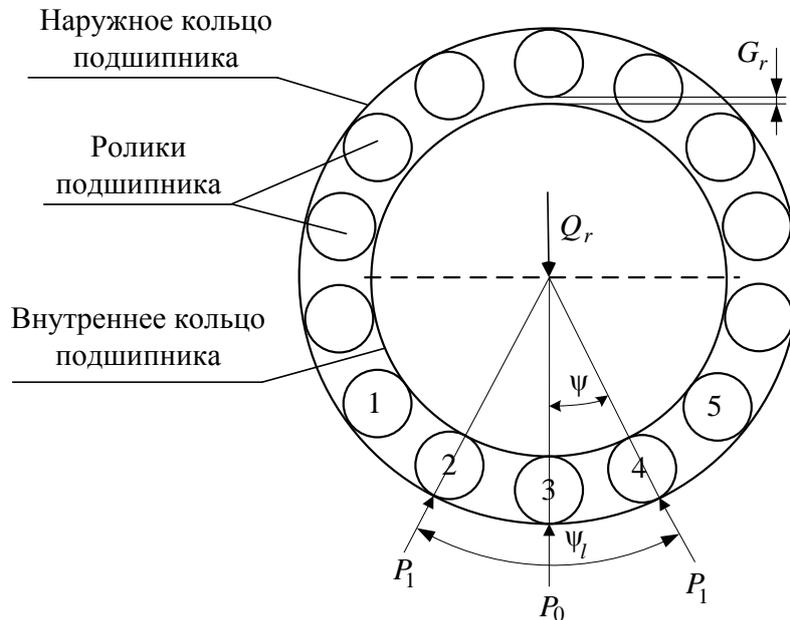


Рисунок 2 – Схема распределения нагрузки между роликами подшипника

На рисунке 3 приведены зависимости распределения нагрузки между роликами подшипника от радиального зазора.

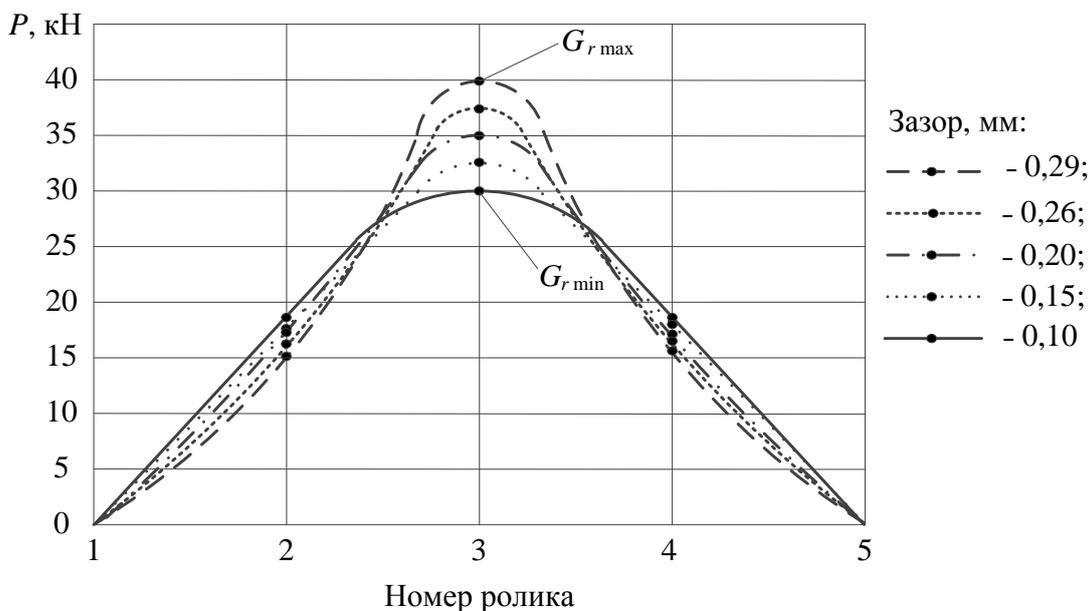


Рисунок 3 – Распределение нагрузки между роликами при разных значениях радиального зазора

Установлено, что с увеличением радиального зазора повышается нагрузка на наиболее нагруженный ролик.

Таким образом, разработаны методика, алгоритм и компьютерная программа для расчета распределения нагрузки в роликовом подшипнике с учетом радиального зазора. По описанной методике произведен расчет роликового подшипника тягового двигателя, для электровоза, эксплуатируемого на участке Сарга – Сабик, имеющем горный профиль пути. В результате выполненных расчетов сделан вывод о том, что с увеличением радиального зазора возрастает нагрузка P_{\max} на наиболее нагруженный ролик, находящийся под номером три. Нагрузка, действующая на подшипник, распределяется по дуге, ограниченной углом $\psi_l = 54^\circ$ при минимальном радиальном зазоре и $\psi_l = 39^\circ$ при максимальном, при этом нагрузка воспринимается только тремя роликами.

В заключение можно сделать вывод о том, что, руководствуясь описанным алгоритмом, можно увеличить срок службы подшипников путем выбора эффективного радиального зазора, поскольку долговечность роликовых подшипников определяется как отношение базовой грузоподъемности к максимальной нагрузке P_{\max} , возведенное в степень $10/3$.

Список литературы

1. Мишин, Я. А. Методика расчета тока в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя [Текст] / Я. А. Мишин // Вестник УрГУПС / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 3 (35). – С. 118 – 127.
2. Буйносов, А. П. Повреждение роликовых подшипников электровозов электрическим током [Текст] / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного трансп. – Новосибирск. – 2015. – № 1. – С. 166 – 169.
3. Буйносов, А. П. Определение интенсивности отказов подшипников колесно-моторного блока электровозов 2ЭС6 [Текст] / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Научно-технический вестник Поволжья / Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2014. – № 3. – С. 81 – 84.
4. Stribeck R. Kugellager fur beiebiege Belastungen Z. VDI. 1901, Bd. 45.
5. Eschman P., Das Leistungsvermogen der Walzlager, Springer – Verlag – Berlin – Gottigen, Heidelberg, 1964, 185 p.
6. Подшипники качения: Справочник [Текст] / Р. Д. Байзельман, Б. В. Цыпкин и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 572 с.
7. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник [Текст] / Под ред. Л. Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.
8. Harris, T. A., Kotzalas, M. N. Essential Concepts of Bearing Technology. New York, 2006, 376 p.
9. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту узлов с подшипниками качения локомотивов и моторвагонного подвижного состава. ЦТ-330. Утв. 11.07.1995 / МПС РФ. – М., 1995. – 73 с.
10. Заикин, Г. И. Определение сил, действующих на якорные роликовые подшипники тяговых электродвигателей локомотивов [Текст] / Г. И. Заикин // Тр. ЦНИИ МПС. – 1965. – Вып. 295. – С. 59 – 78.
11. Бородин, А. В. Совершенствование конструкции моторно-осевого узла колесно-моторного блока локомотива [Текст] / А. В. Бородин, Д. В. Тарута // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С. 12 – 15.
12. Четвергов, В. А. Модели параметрических отказов локомотивов в эксплуатации [Текст] / В. А. Четвергов, С. М. Овчаренко, К. И. Грейф // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2 (10). – С. 51 – 58.

References

1. Mishin Ya. A. Metodika rascheta toka v kolesno-motornom bloke pri avariynykh rezhimakh raboty tyagovogo dvigatelya [The method of calculating the current in the wheel-motor unit during emergency operation of the traction motor]. *Vestnik UrGUPS*, 2017, № 3 (35). p. 118 – 127.

2. Buynosov A. P., Mishin Ya. A. Povrezhdenie rolikovykh podshipnikov elektrovozov elektricheskim tokom [Damage to electric locomotive roller bearings]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka*. 2015. № 1. pp. 166 – 169.
3. Buynosov A. P., Mishin Ya. A. Opredelenie intensivnosti otkazov podshipnikov kolesno-motornogo bloka elektrovozov 2ES6 [Determination of failure rate of bearings of wheel-motor unit of electric locomotives 2ES6]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, № 3. pp. 81 – 84.
4. Stribeck R. Kugellager fur beiebiege Belastungen Z. VDI. 1901, Bd. 45.
5. Eschman P., Das Leistungsvermogen der Walzlager, Springer – Verlag – Berlin – Gottigen, Heidelberg, 1964, p. 185.
6. Bayzel'man R. D., Tsypkin B. V. Podshipniki kacheniya: Spravochnik [Rolling bearings]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 572 p.
7. Podshipniki kacheniya: Raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor: Spravochnik [Rolling bearings: Design, design and maintenance of bearings]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 543 p.
8. Harris, T. A. Kotzalas, M. N. Essential Concepts of Bearing Technology. New York, 2006, 376 p.
9. Instruksiey po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu uzlov s podshipnikami kacheniya lokomotivov i motorvagonnogo podvizhnogo sostava. TsT-330. Utv. 11.07.1995. Moscow: MPS RF, 1995. 73 p.
10. Zaikin G. I. Opredelenie sil, dejstvuyushchih na yakornye rolikovye podshipniki tyagovyh ehlektrovdigatelej lokomotivov. Tr. CNII MPS. 1965. pp. 59 – 78.
11. Borodin A. V., Taruta D. V. Improvement of the design of the motor-axial unit of the wheel-motor unit of the locomotive [Sovershenstvovanie konstruktsii motorno-osevogo uzla kole-sno-motornogo bloka lokomotiva]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 4 (4), pp. 12 – 15.
12. Thursdays V. A., Ovcharenko S. M., Greif K. I. Models of parametric failure of locomotives in operationays [Modeli parametricheskikh otkazov lokomotivov v ekspluatatsii]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 2 (10), pp. 51 – 58.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буйносов Александр Петрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

Тел.: (343) 221-24-70, (343) 319-59-32.

E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru

Мишин Ярослав Александрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Инженер кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

Тел.: (343) 221-24-70.

E-mail: yaroslav_mishin@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Буйносов, А. П. Расчет распределения нагрузки между телами качения в роликовом подшипнике тягового двигателя электровоза [Текст] / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 2 – 8.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Buinosov Alexander Petrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Electric traction», USURT.

Tel: (343) 221-24-70, (343) 319-59-32.

E-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@usurt.ru

Mishin Yaroslav Aleksandrovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034, Russia.

Department Engineer t «Electric traction».

Tel: (343) 221-24-70.

E-mail: yaroslav_mishin@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Buinosov A. P., Mishin Ya. A.. The method of calculating the load distribution between the rolling elements in a roller bearing traction motor. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 2 – 8. (In Russian).

УДК 621.336

А. С. Голубков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

***Аннотация.** Рассмотрены особенности современных систем автоматического регулирования токоприемников. Выполнен анализ частотного спектра контактного нажатия токоприемников при высоких скоростях движения, на основе которого были определены характеристики системы автоматического регулирования, позволяющей значительно повысить качество токосъема. Предложены пути совершенствования устройств автоматического регулирования токоприемников, направленные на повышение быстродействия и снижение инерционности системы.*

***Ключевые слова:** токоприемник, контактное нажатие, система автоматического регулирования.*

Anton S. Golubkov, Oleg A. Sidorov, Victor M. Philippov

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

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR HIGH-SPEED PANTOGRAPHS

***Abstract.** Considered the features of modern automatic control systems of pantographs. The spectral density analysis of pantograph contact force at high speeds showed requirements for robust control systems, which allows to significantly improve the quality of the current collection. Proposed the ways to improve the automatic control systems for pantographs, aimed at improving the speed and reducing the inertia of the system.*

***Keywords:** pantograph, current collector, contact force, automatic control system.*

В настоящее время на железных дорогах России для токосъема применяются токоприемники пассивного типа. В таких токоприемниках статическое нажатие не зависит от условий работы и внешних воздействий, отсутствуют системы автоматического регулирования нажатия. Данный подход позволяет обеспечить удовлетворительное качество токосъема при скоростях движения до 160 км/ч для контактных подвесок общего назначения и до 250 км/ч для скоростных контактных подвесок. Повышение скоростей движения связано с ростом динамических нагрузок на токоприемник и контактную подвеску, что приводит к потере контакта, дугообразованию и повышенному износу контактных материалов, поэтому для повышения качества токосъема, продления срока безотказной работы и повышения надежности системы токосъема необходимо разрабатывать системы активного регулирования контактного нажатия.

В России и за рубежом ведутся разработки по внедрению устройств активного регулирования нажатия в конструкции токоприемников [1].

Преимуществами применения систем активного регулирования токоприемниками являются оптимизация контактного нажатия для снижения износа токосъемных пластин и контактных проводов, повышение надежности эксплуатации в условиях неблагоприятных погодных факторов, таких как ветер и гололед, повышение эффективности применения нескольких токоприемников на одном электроподвижном составе (ЭПС) [2]. Кроме перечисленного система автоматического управления может выполнять функции контроля, диагностики и автоматического аварийного опускания при ударе о препятствие на контактной сети [3].

В основе системы регулирования нажатия лежит принцип замкнутой системы с обратной связью, где токоприемник является объектом управления с контактным нажатием в качестве

регулируемой величины. Контактное нажатие измеряется при помощи тензометрических, оптоволоконных или пневматических датчиков [4].

В качестве исполнительного механизма автоматического регулятора обычно используется пневматический резинокордный элемент, обеспечивающий подъемное усилие токоприемника. Управляющее воздействие регулятора приводит к изменению давления в пневматическом резинокордном элементе, в результате чего изменение усилия передается в точку контакта [5, 6].

Структурная схема модели системы управления токоприемника может быть представлена в виде, изображенном на рисунке 1.

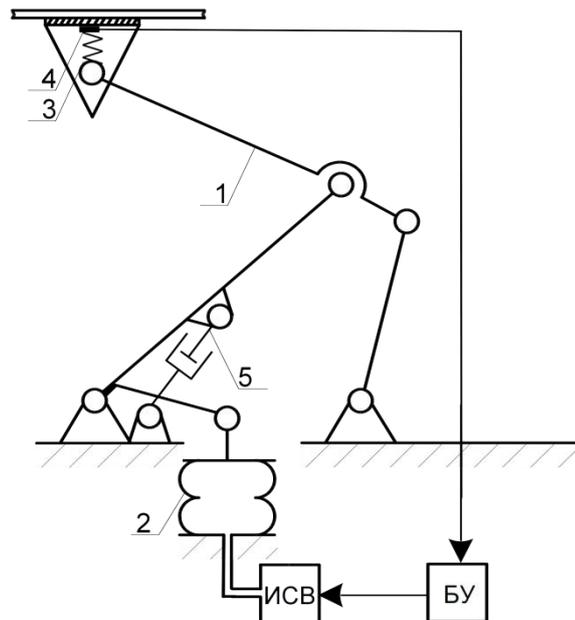


Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматического регулирования (САР) токоприемника: 1 – система подвижных рам; 2 – резинокордный подъемный элемент; 3 – каретка; 4 – датчик нажатия; 5 – демпфер; ИСВ – источник сжатого воздуха; БУ – блок управления

Для оценки эффективности системы автоматического регулирования токоприемника целесообразно рассматривать ее частотные характеристики, это связано с циклическим характером работы токоприемника. Основные частоты колебаний величины контактного нажатия связаны с длинами пролетов контактной сети, размерами межструновых интервалов, собственными частотами колебаний ЭПС и системы подвижных рам токоприемника [7].

Анализ кривых контактного нажатия по результатам экспериментальных испытаний различных типов токоприемников и контактных подвесок показывает, что основная частота изменения контактного нажатия имеет высокую степень корреляции со скоростью движения ЭПС v и длинами пролетов контактной сети $l_{пр}$, эту зависимость можно выразить как частоту прохождения пролетов контактной сети:

$$f_{кн} = \frac{l_{пр}}{v}.$$

На рисунке 2 показаны типичные графики контактного нажатия и его амплитудный спектр при движении токоприемника электровоза ЭП20 с различными скоростями по участку испытательного полигона Белореченская – Майкоп, полученные в ходе квалификационных испытаний в 2015 г. [8].

В таблице приведены данные анализа частотного спектра колебаний контактного нажатия по результатам динамических испытаний токоприемников различных типов в период с 2009 по 2015 г.

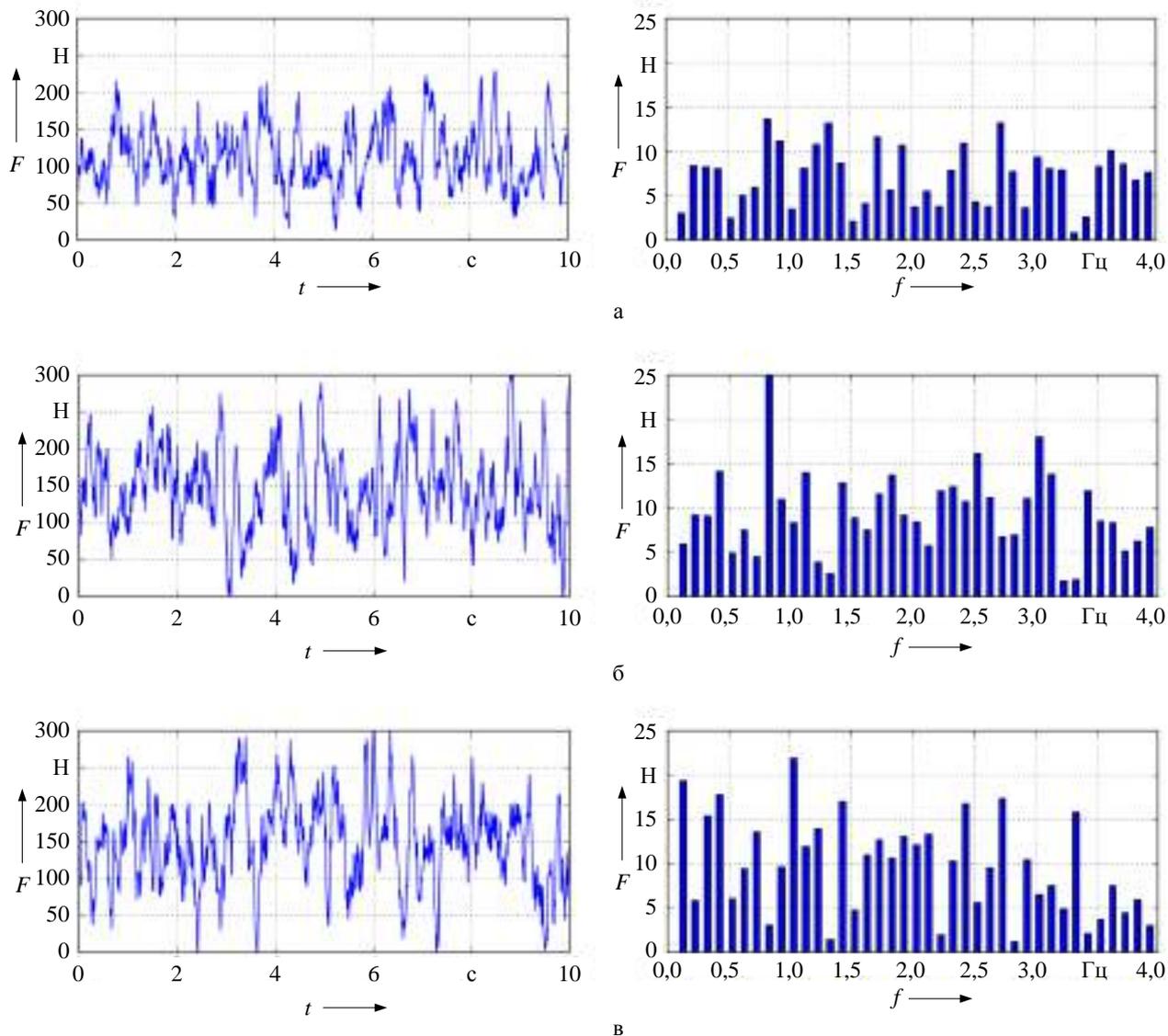


Рисунок 2 – Графики контактного нажатия и спектральный состав колебаний при скорости движения: 180 км/ч (а), 200 км/ч (б) и 220 км/ч (в)

При скоростях движения 200 – 300 км/ч и длинах пролетов от 60 до 70 м основная частота изменения контактного нажатия лежит в диапазоне от 0,8 до 1,4 Гц.

Эффективность автоматического регулирования можно определить по амплитудно-частотной характеристике, рассматривая токоприемник в качестве апериодического звена первого порядка.

Постоянная времени токоприемника может определяться по результатам экспериментального измерения силы контактного нажатия при изменении давления в пневмосистеме.

На рисунке 3, а показан график изменения контактного нажатия токоприемника Siemens SSS-87RZD при подаче повышенного давления в пневмосистему в виде ступенчатого воздействия в результате переключения клапана [9].

По графику переходного процесса постоянная времени составляет 1,33 с.

Анализ зависимости основной частоты колебаний контактного нажатия от параметров движения

| Год | Полигон испытаний | Токоприемник | Скорость, км/ч | Длина пролета контактной сети, м | Основная частота контактного нажатия, Гц | Частота прохождения пролетов $f_{КС}$, Гц |
|------|-------------------------------|-------------------|----------------|----------------------------------|--|--|
| 2009 | Лихославль – Калашниково | Siemens SSS-87RZD | 220 | 64 | 0,9 | 0,95 |
| | | | 240 | 64 | 1,1 | 1,04 |
| | | | 250 | 64 | 1,1 | 1,09 |
| 2012 | Малая Вишера – Мстинский Мост | Faveley AX 023 BU | 180 | 67 | 0,8 | 0,75 |
| | | | 200 | 67 | 0,8 | 0,83 |
| | | | 220 | 67 | 0,9 | 0,91 |
| 2015 | Белореченская – Майкоп | TacC-24 | 180 | 65 | 0,8 | 0,78 |
| | | | 200 | 65 | 0,9 | 0,87 |
| | | | 220 | 65 | 1,0 | 0,95 |

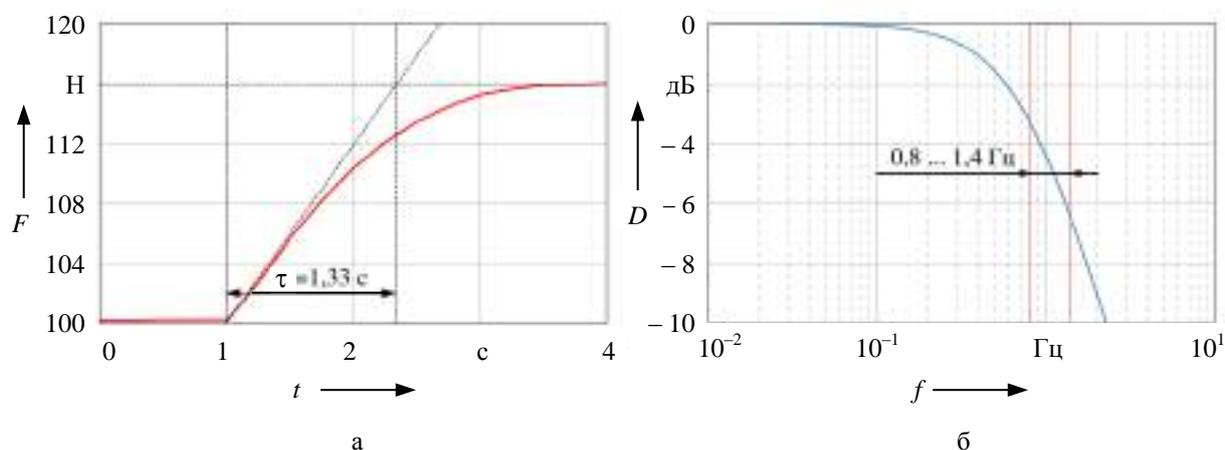


Рисунок 3 – Характеристики срабатывания пневматического привода токоприемника:
а – переходная функция статического нажатия; б – амплитудно-частотная характеристика

На рисунке 3, б показана амплитудно-частотная характеристика апериодического звена для данной постоянной времени. Как видно из рисунка, система управления на основе регулирования давления в пневмоприводе теряет свою эффективность при частотах выше 0,5 – 0,6 Гц, что значительно ниже основной частоты колебаний контактного нажатия при высоких скоростях движения.

Данная особенность конструкции токоприемника является причиной отсутствия широкого внедрения систем автоматического регулирования нажатия токоприемников. Для реализации эффективной системы автоматического регулирования необходимо обеспечить снижение инертности регулятора [10].

Поскольку пневматический подъемно-опускающий механизм обладает большой инерцией и не позволяет эффективно регулировать контактное нажатие, применение дополнительного малоинерционного исполнительного механизма позволит увеличить быстродействие системы автоматического регулирования и значительно повысить эффективность регулирования.

В качестве исполнительного механизма может использоваться регулируемый демпфер на основе ферромагнитной жидкости. Конструкция современных токоприемников предусматривает наличие демпфирующих устройств, поэтому управляемый демпфер может применяться в токоприемнике без модификации конструкции системы подвижных рам.

Управляемый демпфер на основе ферромагнитной жидкости обладает высоким быстродействием и может обеспечить оперативное регулирование характеристик токоприемника в процессе токосъема. Демпфер не может использоваться в качестве основного регулятора контактного нажатия, поскольку его воздействие передается в точку контакта через систему подвижных рам с большой инерцией. Кроме того, демпфер оказывает воздействие на систему подвижных рам только в виде реакции на движение и не оказывает воздействия на нажатие при неизменном высотном положении токоприемника.

Для обеспечения возможности непосредственного воздействия на контактное нажатие необходимо использовать исполнительное устройство вблизи точки контакта. Такое воздействие может оказать линейный актуатор, встроенный в каретку токоприемника. Каретка токоприемника обеспечивает вторичное подрессоривание полоза и отработку перемещений контактного провода в пролете. Линейный актуатор должен обеспечивать малоинерционное воздействие на полз токоприемника с силой, достаточной для компенсации разброса контактного нажатия.

Схема системы автоматического регулирования токоприемника с линейным актуатором в каретке и регулируемым демпфером показана на рисунке 4.

Модель системы автоматического регулирования токоприемника со вторичным исполнительным механизмом представляет собой двухконтурную схему, в которой первый контур обеспечивает регулирование среднего нажатия за счет изменения давления в пневмоприводе, а второй контур выполняет оперативное регулирование колебаний контактного нажатия.

В качестве актуатора может использоваться пневматический цилиндр, механический привод, электромагнитный привод или другое устройство, обладающее достаточным быстродействием. Для эффективного регулирования контактного нажатия токоприемника постоянная времени для актуатора в каретке должна составлять не более 0,3 с.

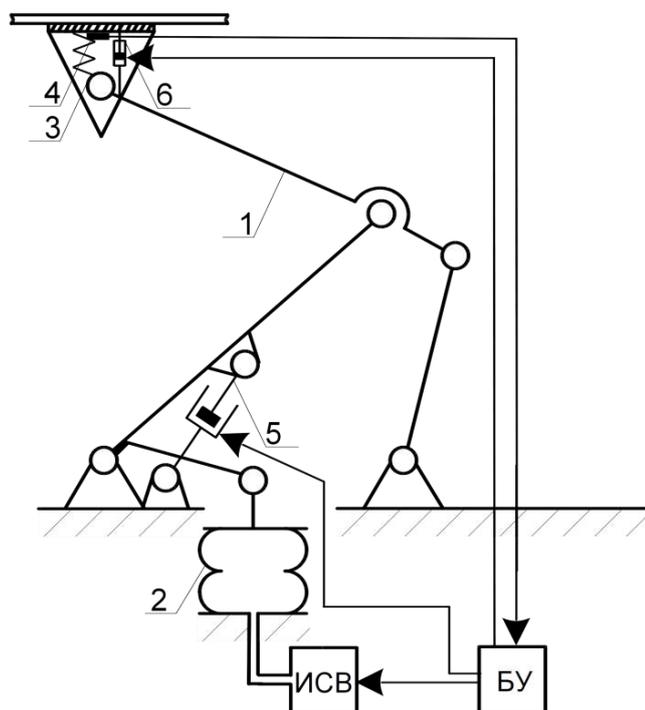


Рисунок 4 – Схема модифицированного САР токоприемника: 1 – система подвижных рам; 2 – резинокордный подъемный элемент; 3 – каретка; 4 – датчик нажатия; 5 – управляемый демпфер; 6 – линейный актуатор; ИСВ – источник сжатого воздуха; БУ – блок управления

Переходная функция регулятора с постоянной времени 0,3 с и амплитудно-частотная характеристика предложенной системы приведены на рисунке 5. Из рисунка видно, что система автоматического регулирования является эффективной в диапазоне колебаний контактного нажатия от 0,8 до 1,4 Гц.

На основе анализа кривых контактного нажатия по результатам испытаний скоростных токоприемников на экспериментальных полигонах были выявлены основные частоты колебаний, приводящие к снижению качества токосъема. Системы регулирования контактного нажатия на основе пневматического подъемного механизма не обеспечивают эффективного регулирования из-за низкого быстродействия и большой инерции.

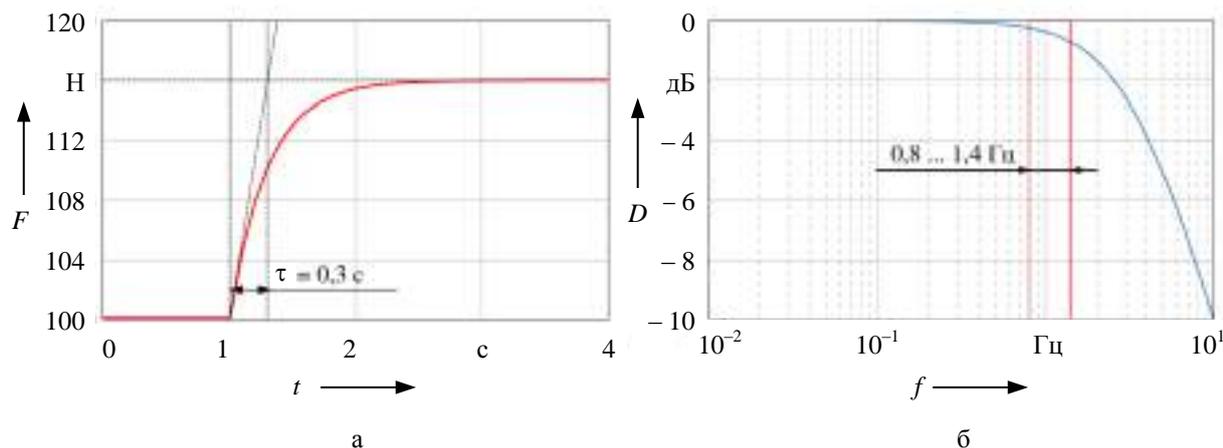


Рисунок 5 – Характеристики работы системы автоматического регулирования нажатия токоприемника с линейным актуатором в каретке:
а – переходная функция нажатия, б – амплитудно-частотная характеристика

Применение быстродействующих регуляторов позволит значительно повысить эффективность регулирования токоприемников. В качестве перспективных регулирующих устройств предлагается использовать управляемый демпфер системы подвижных рам и управляемые упругие элементы каретки.

Применение предложенных схем регулирования нажатия токоприемника позволит повысить качество токосъема на высоких скоростях движения в условиях постоянных случайных воздействий от окружающей среды и контактной подвески.

Список литературы

1. Chater, E., Ghani, D., Giri, F., Rachid, A., Chaoui, F., Haloua, M. Output Feedback Control of Pantograph-Catenary System. *5th IFAC International Workshop on Periodic Control Systems*, 2013, no. 5 (1), pp. 131 – 136.
2. Yamashita, Y., Ikeda, M., Masuda, A. Advanced active control of a contact force between a pantograph and a catenary for a high speed train. *Proceedings of 9th world congress of railway research*, 2011, pp. 28 – 33.
3. Makino, T., Yoshida, K., Seto, S., Makino, K. Running test on current collector with contact force controller for high-speed railways. *JSME International Journal Series*, 1997, no. 4, pp. 671 – 680.
4. Allotta, B., Pisano, A., Pugi, L., Usai, E., VSC of a servo-actuated ATR 90-type pantograph. *Proc. of the 44 th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, 2005, pp. 590 – 595.

5. Сидоров, О. А. Моделирование взаимодействия авторегулируемого токоприемника с контактной подвеской [Текст] / О. А. Сидоров, А. Е. Аркашев, И. В. Ларькин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2011. – № 3 (31). – С. 164 – 169.

6. Пат. № 105862 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник электроподвижного состава [Текст] / Сидоров О. А., Аркашев А. Е., Ларькин И. В., Сосновский С. Ю.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2011100366/11; заявл. 11.01.2011; опубл. 27.06.2011, Бюл. 18.

7. Сидоров, О. А. Экспериментальные исследования токосъемных устройств [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 69, 70.

8. Сидоров, О. А. Инновационные технологии исследования систем токосъема, применяемые в Омском государственном университете путей сообщения [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Вестник ВЭлНИИ / ВЭлНИИ. – № 1 (75). – Новочеркасск. – 2017. – С. 29 – 38.

9. Сидоров, О. А. Совершенствование систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения [Текст] / О. А. Сидоров, В. Н. Горюнов, А. С. Голубков // Динамика систем, механизмов и машин / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2017. Т. 5. – № 3. – С. 108 – 113.

10. Sidorov, O. A., Gorjunov, V. N., Golubkov, A. S. Improvement of automatic control system for high-speed current collectors. *The Journal of Physics*, 2018, pp. 1 – 6.

References

1. Chater E., Ghani D., Giri F., Rachid A., Chaoui F., Haloua M. Output Feedback Control of Pantograph-Catenary System. *5th IFAC International Workshop on Periodic Control Systems*, 2013, no. 5 (1), pp. 131 – 136.

2. Yamashita Y., Ikeda M., Masuda A. Advanced active control of a contact force between a pantograph and a catenary for a high speed train. *Proceedings of 9th world congress of railway research*, 2011, pp. 28 – 33.

3. Makino T., Yoshida K., Seto S., Makino K. Running test on current collector with contact force controller for high-speed railways. *JSME International Journal Series*, 1997, no. 4, pp. 671 – 680.

4. Allotta B., Pisano A., Pugi L., Usai E., VSC of a servo-actuated ATR 90-type pantograph. *Proc. of the 44 th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, 2005, pp. 590 – 595.

5. Sidorov O. A., Arkashev A. E., Larkin I. V. Simulation of the interaction of an auto-adjustable current collector with a contact suspension [Modelirovaniye vzaimodejstvija avtoregulirujemogo tokoprijemnika s kontaktnoj podveskoj]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovaniye – The journal of Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2011, no. 3 (31), pp. 164 – 169.

6. Sidorov O. A., Arkashev A. E., Larkin I. V., Sosnovskij S. Iu. *Patent RU 105862 B 60 L 5/00*, 27.06.2011.

7. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. Experimental studies of collector devices [Eksperimentalnye issledovaniya tokosjennyh ustrojstv]. *Zheleznodorozhnyj transport – The journal of Railway transport*, 2015, no. 11, pp. 69 – 70.

8. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. Innovative technologies for the study of current collection systems used in the Omsk State Transport University [Innovacionnyje tehnologii issledovaniya sistem tokosjema, primenjaemyje v Omskom gosudarstvennom universitete putej soobshhenija]. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktor'skogo instituta*

elektrovozostroeniya – The bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive, 2017, no. 1 (75), pp. 29 – 38.

9. Sidorov O. A., Gorjunov V. N., Golubkov A. S. Improvement of automatic control systems for current collectors for high speeds [Sovershenstvovaniye sistem avtomaticheskogo regulirovaniya tokopriemnikov dlja vysokih skorostej dvizheniya] *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin* – The journal of Dynamics of systems, mechanisms and machines, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 108 – 113.

10. Sidorov O. A., Gorjunov V. N., Golubkov A. S. Improvement of automatic control system for high-speed current collectors. *The Journal of Physics*, 2018, pp. 1 – 6

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Филиппов Виктор Михайлович

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: fvm-omgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Голубков, А. С. Повышение эффективности систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения [Текст] / А. С. Голубков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 9 – 16.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Head of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Philippov Victor Mikhailovitch

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: fvm-omgups@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Golubkov A. S., Sidorov O. A., Philippov V. M. Improvement of the efficiency of automatic control systems for high-speed pantographs. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 9 – 16 (In Russian).

УДК 629.423

А. С. Мазнев, А. А. Киселев

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

УЛУЧШЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Рассмотрены возможности улучшения регулировочных свойств и технических характеристик электрического подвижного состава с коллекторными тяговыми электродвигателями. Полупроводниковые приборы позволяют повысить плавность пуска тяговых двигателей за счет более равномерного повышения напряжения, плавного регулирования тока возбуждения в тяговом и тормозном режимах. Разработаны варианты упрощенных силовых схем восьмиосных электровозов постоянного тока с минимальным числом коммутационных электрических аппаратов, позволяющие снизить массу и габариты оборудования, повысить надежность функционирования силовых цепей. Рассмотрены схемные решения защиты колесных пар электровоза от боксования и юза за счет усиления возбуждения тяговых двигателей. Отмечена роль полупроводниковых преобразователей в совершенствовании подвижного состава с комбинированным и двойным питанием. Перечислены способы повышения эффективности электрического торможения коллекторными тяговыми двигателями. Отмечена необходимость применения адаптивных микропроцессорных систем управления полупроводниковыми преобразователями для расширения их функциональных возможностей и реализации оптимальных параметров электроподвижного состава постоянного тока.

Ключевые слова: электровоз постоянного тока, тяговый электродвигатель, импульсное регулирование, полупроводниковый прибор.

Aleksandr S. Maznev, Aleksandr A. Kiselev

Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, the Russian Federation

IMPROVING OF CONTROLLING INDEXES ON DC RAILWAY STOCK

Abstract. In the article the possibilities of improving the adjustment properties and technical characteristics of electric rolling stock with collector traction motors are considered. Semiconductor devices can improve the smoothness of the traction motors start-up due to a more even voltage increase, smooth regulation of the field current in the traction and braking modes. Variants of simplified power circuits of eight-axis direct current electric locomotives with a minimum number of switching electrical devices have been developed, allowing to reduce weight and size of the equipment, increase the reliability of power circuits operations. Circuit solutions for protecting the wheelset of an electric locomotive from boxing and skidding by enhancing the traction motors field are considered. The role of semiconductor converters in the improvement of rolling stock with a combined and dual power is noted. The ways to improve the efficiency of electric braking by collector traction motors are listed. The necessity of using adaptive microprocessor control systems for semiconductor converters for expanding their functional capabilities and realizing optimal parameters of direct current rolling stock is noted.

Keywords: DC railway stock, traction electric motor, pulse regulation, semiconductor device.

Современные силовые полупроводниковые приборы открывают новые возможности совершенствования тягово-энергетических и эксплуатационных характеристик электровозов постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями. Одним из важнейших тяговых показателей является гибкость регулирования силы тяги, скорости, мощности, коэффициента полезного действия (КПД) локомотива.

Применяемые на электроподвижном составе (ЭПС) контакторно-резисторные системы управления могут быть модернизированы путем использования полностью управляемых «ключей» (на основе тиристоров GTO, MCT, IGCT или транзисторов IGBT, IEGT).

На рисунке 1 изображены упрощенные схемы силовой цепи электровоза постоянного тока с тремя соединениями тяговых двигателей, на каждом из которых для регулирования величины сопротивления пусковых резисторов $R_{п1} - R_{п4}$ применены двухоперационные тири-

торы Т1 – Т4, позволяющие плавно изменять мощность, подводимую к тяговым электродвигателям, что дает возможность реализовать пусковой ток, ограниченный условиями сцепления, повысить ускорение и снизить расход электроэнергии при пуске.

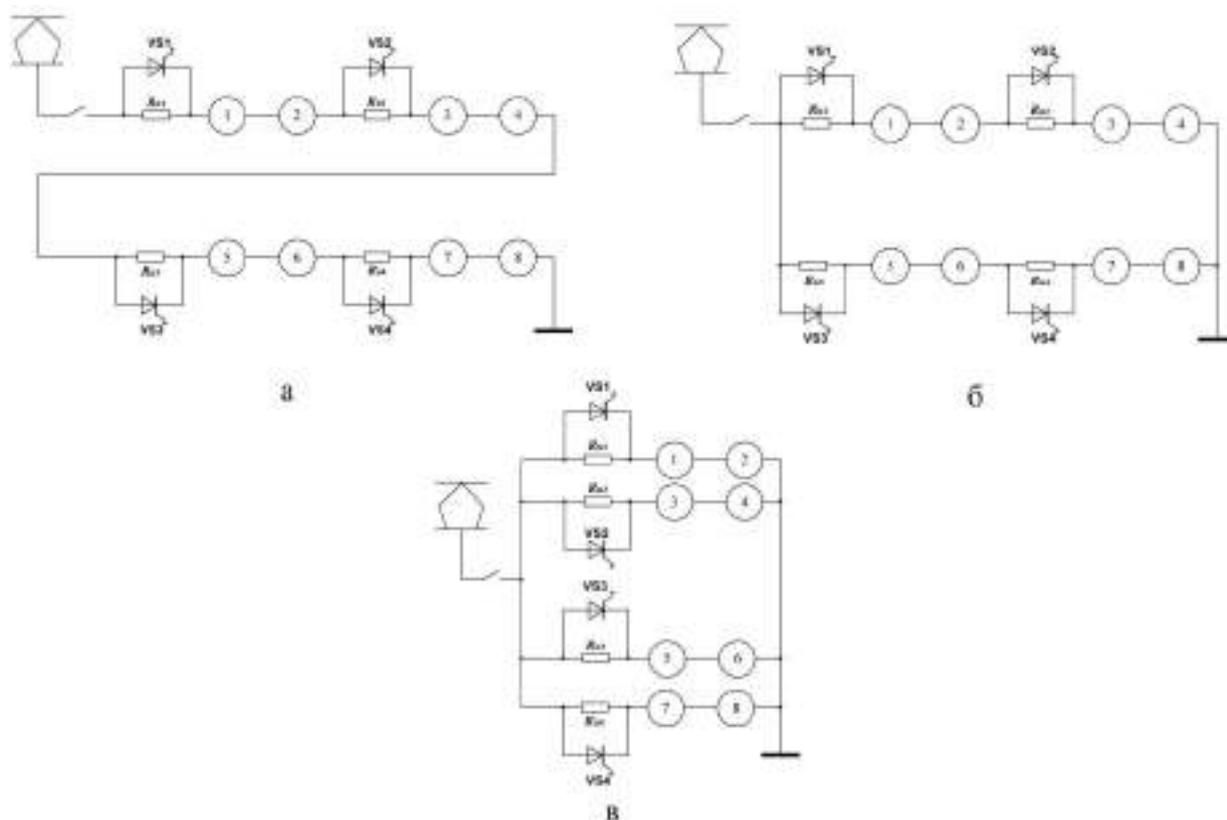


Рисунок 1 – Схемы импульсного регулирования пусковых резисторов:
 а – при последовательном соединении; б – последовательно-параллельном соединении;
 в – параллельном соединении тяговых двигателей

Представленный на рисунке 1 вариант схемы позволяет ограничить броски тока якорей двигателей при колебании напряжения питания и, что особенно важно, в случаях, связанных с потерей питания.

Непрерывность тока, потребляемого от контактной сети, исключает необходимость использования дополнительных силовых элементов (обратные диоды, шунтирующие обмотки тяговых двигателей, конденсатор и реактор входного фильтра) в схемах импульсного регулирования сопротивления с помощью управляемых «ключей», работающих на частоте, ограниченной их техническими характеристиками.

Структура регулятора определяется параметрами полупроводниковых приборов: типом и классом по напряжению. Для уменьшения стоимости преобразователя пусковые сопротивления целесообразно разбить на нерегулируемые и регулируемые импульсными прерывателями ступени [1]. Нерегулируемые ступени закорачиваются контакторами после того, как коэффициент заполнения преобразователя достигает единицы. При равенстве сопротивлений ступеней обеспечивается постоянство максимального значения пускового тока.

Применение импульсного регулирования напряжения питания для пуска тяговых двигателей еще больше снижает потери при пуске ЭПС и потребление тока при плавном его увеличении, что особенно важно в условиях интенсивного движения. Уменьшение провалов напряжения контактной сети может повысить техническую скорость ЭПС. Это обстоятельство при некотором увеличении расхода электроэнергии на тягу позволяет сократить время хода по перегону. Расчеты, выполненные в статье [2], показывают увеличение удель-

ного расхода электроэнергии на тягу на 7...10 % при повышении средней скорости движения поезда массой 6000 т с 50 до 60 км/ч [3].

При перегруппировке тяговых электродвигателей электровозов имеет место снижение сил тяги, которое можно устранить за счет диодного перехода. Диод, включаемый на переходной позиции, препятствует возникновению кратковременного генераторного режима и разделяет параллельные ветви двигателей.

Особенностью грузовых восьмиосных электровозов постоянного тока является неравномерность распределения напряжения тяговых двигателей при различных группировках: 375 В на последовательном (С), 750 В на последовательно-параллельном (СП) и 1500 В на параллельном (П) соединении. Область скоростей между автоматическими тяговыми характеристиками двух последних группировок лежит между 40 и 65 км/ч и является наиболее используемой в эксплуатации. При тяге поездов повышенной массы на расчетных подъемах электровоз вынужден следовать либо на искусственных позициях с реостатами, либо на СП позиции с нормальным возбуждением и скоростью 25 – 30 км/ч [4], что существенно снижает техническую скорость. Движение на позициях с ослаблением возбуждения на расчетном подъеме неблагоприятно ввиду мягкости тяговых характеристик.

Для повышения экономичности и плавности пуска грузовых восьмиосных электровозов постоянного тока целесообразно увеличить число группировок соединения тяговых двигателей до четырех: последовательное, два вида последовательно-параллельных (СП1 и СП2), параллельное [5].

Дополнительное последовательно-параллельное соединение содержит три группы (в отличие от штатного последовательно-параллельного соединения), две из которых содержат по три последовательно соединенных двигателя, а третья – импульсный регулятор (ИР) и два последовательно соединенных двигателя (рисунок 2). Такая структура схемы позволяет получать более равномерное повышение напряжения на электродвигателях (375 В, 750, 1000 и 1500 В).

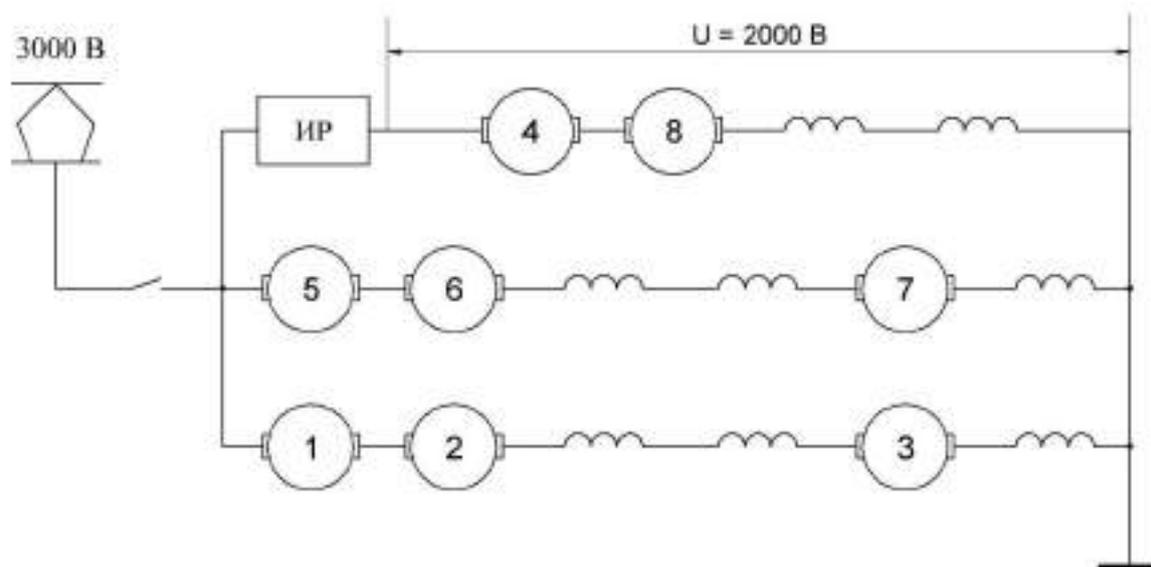


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная силовая схема электровоза с дополнительным последовательно-параллельным соединением тяговых двигателей

На рисунке 3 изображен вариант схемы силовой цепи электровоза для работы на соединениях СП1 и СП2 [6]. Последовательность замыкания контакторов при переходе с одного соединения двигателей на другое приведена в таблице (прочерком обозначены переходные позиции).

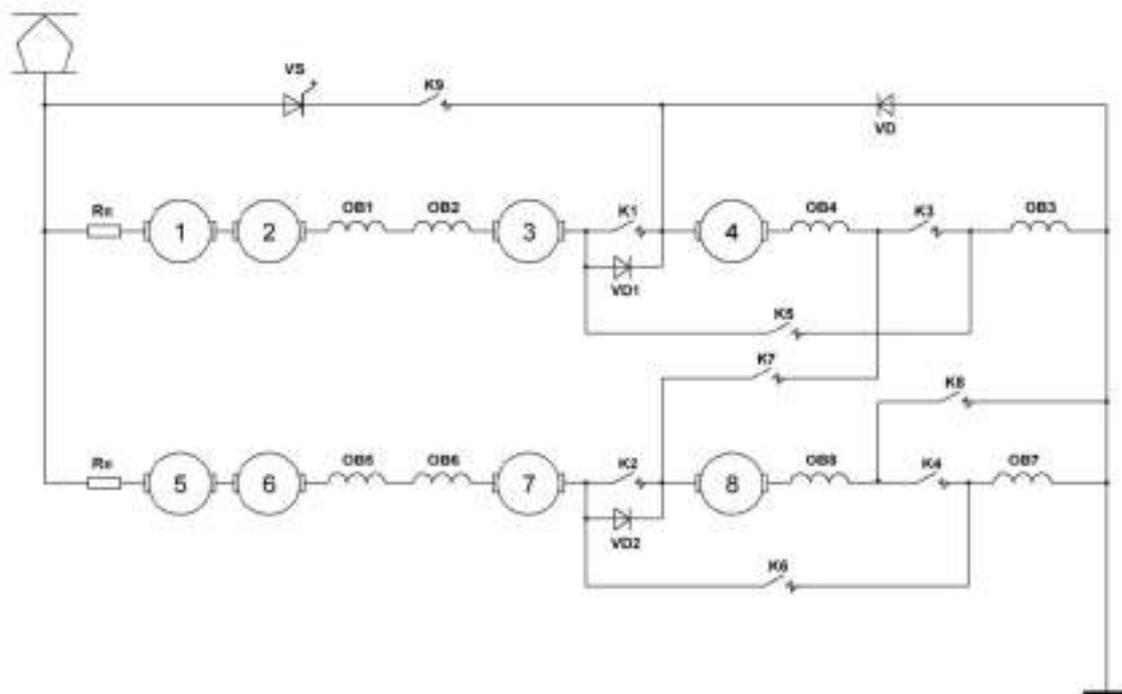


Рисунок 3 – Принципиальная схема электровоза постоянного тока с дополнительным последовательно-параллельным соединением тяговых двигателей

Последовательность замыкания контакторов при переходе с СП1 на СП2 соединение

| Контакторы | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| СП1 | • | • | • | • | | | | | |
| – | | | • | • | • | • | | | |
| – | | | | | • | • | | | |
| СП2 | | | | | • | • | • | • | • |

Тяговые характеристики для четырех схем соединения тяговых двигателей электровоза изображены на рисунке 4.

Логическим продолжением разработок по улучшению регулировочных свойств, позволяющих одновременно снизить пусковые потери, является вариант силовой цепи восьмиосного электровоза, принципиальная схема которой изображена на рисунке 5. За счет увеличения числа преобразователей (два вместо одного) по сравнению со схемой, изображенной на рисунке 3, появляется возможность значительно упростить структуру силовой цепи электровоза.

Пуск электровоза с такой структурой реализуется с последовательно-параллельного соединения тяговых двигателей. Контакторы K1 – K4 разомкнуты. При отпирании импульсных преобразователей ИР1 и ИР2 двигатели соответствующих параллельных ветвей получают питание от контактной сети. После запираания импульсных преобразователей токи каждой пары тяговых двигателей замыкаются через обратные диоды Д1, Д3, Д4, Д6 и разделитель-

ные диоды Д2 и Д5. При коэффициенте заполнения, равном единице, последовательно соединенные двигатели каждой параллельной ветви подключаются непосредственно к источнику питания.

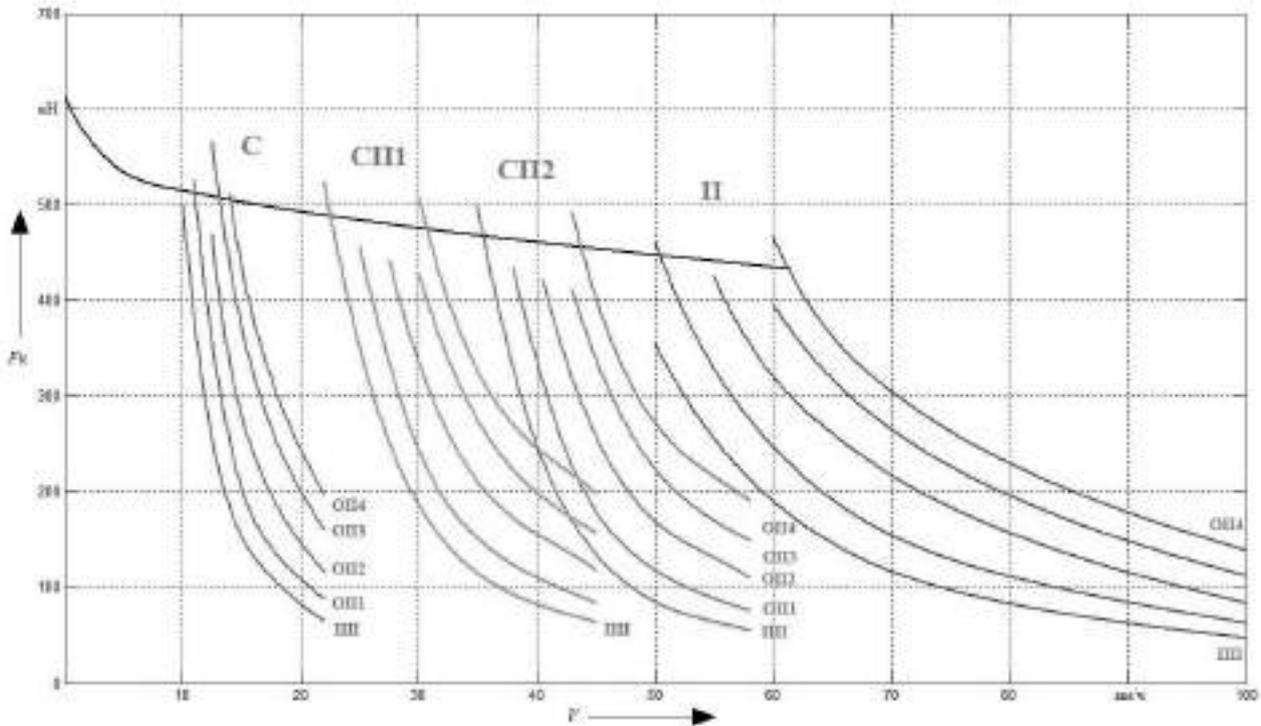


Рисунок 4 – Тяговые характеристики электровоза постоянного тока с четырьмя группировками двигателей

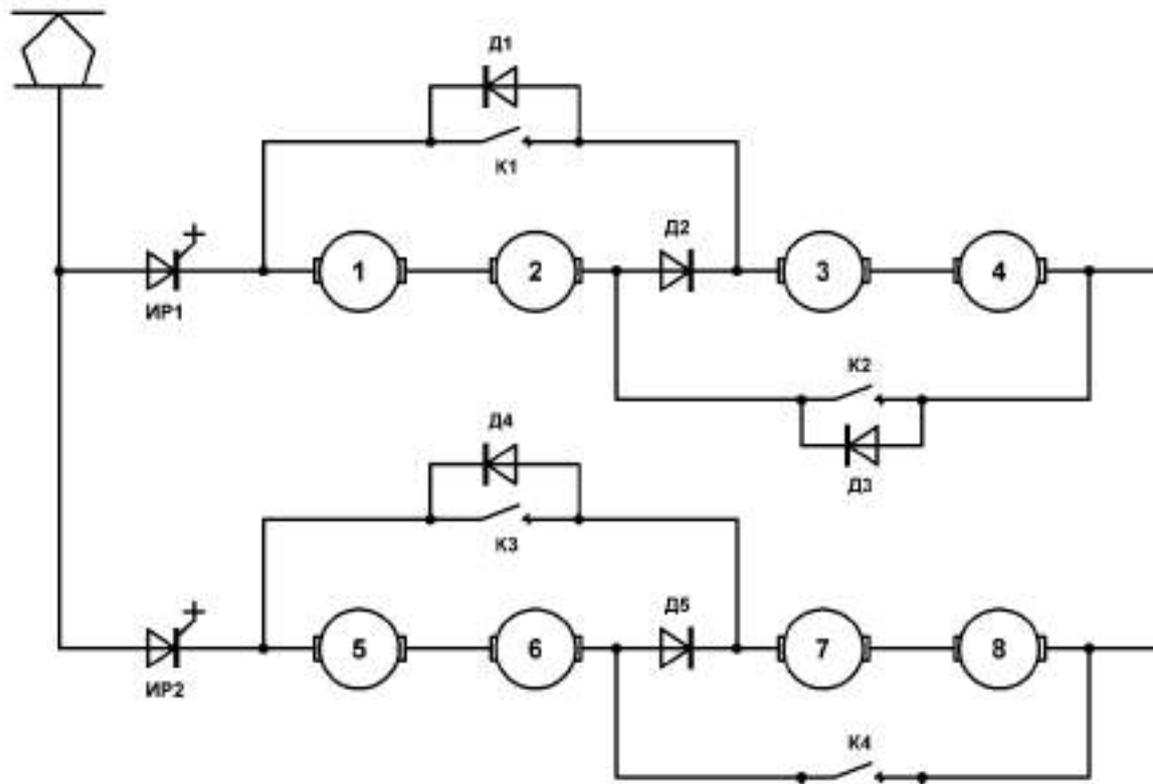


Рисунок 5 – Принципиальная схема электровоза постоянного тока импульсными преобразователями и двумя группировками соединений ТЭД (последовательно-параллельное и параллельное)

Переход с последовательно-параллельного соединения на параллельное осуществляется за счет замыкания контакторов К1 – К4 после предварительного уменьшения коэффициента заполнения до 0,5, что обеспечивает плавный переход без бросков тока якорей. На параллельном соединении при запертых импульсных преобразователях ИП1 и ИП2 ток каждой пары тяговых двигателей замыкается через разделительные диоды. В дальнейшем коэффициент заполнения увеличивается до единицы.

За счет сдвига времени отпираания одного импульсного преобразователя по отношению к другому повышается частота отбора энергии от источника питания, что позволяет снизить массу и габариты входного фильтра. Аналогично схемам, изображенным на рисунке 1, данная структура способна ограничить броски тока двигателей в случае колебаний напряжения контактной сети вплоть до перебоя питания. За счет исключения групповых реостатных контроллеров и пусковых резисторов с заменой на силовые полупроводниковые приборы и входной фильтр повышаются надежность и массогабаритные показатели электрооборудования ЭПС.

Для повышения плавности регулирования скорости движения за счет ослабления возбуждения электродвигателей может быть применена схема, использующая полностью управляемые полупроводниковые приборы (рисунок 6). Отсутствие индуктивных шунтов улучшает массогабаритные показатели оборудования подвижного состава [7].

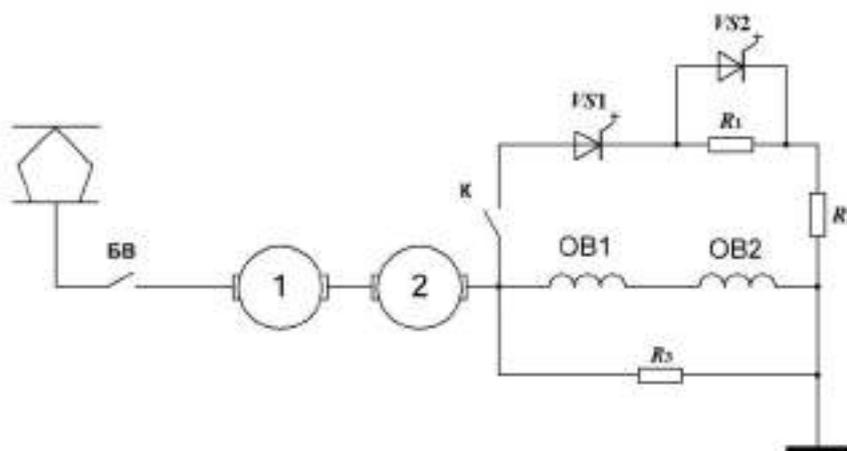


Рисунок 6 – Схема импульсного ослабления возбуждения

С увеличением массы поезда на участках с трудным профилем возрастают вероятность нарушения сцепления колесных пар с рельсами и необходимость в более совершенных устройствах обнаружения и устранения боксования и юза.

Проскальзывание колесных пар, переходящее в боксование или юз, особенно может усугубиться при пуске электровоза с поддержанием постоянства пускового тока. Для быстродействующей системы регулирования напряжения на двигателях необходима не менее быстродействующая система обнаружения и защиты боксования и юза [8].

Известны многочисленные разработки систем контроля скольжения колесных пар, эффективность которых может быть повышена за счет полупроводниковых устройств, способных выявлять развивающийся процесс боксования и юза при любом знаке напряжения статического небаланса и скольжения любой из двух колесных пар тележки ЭПС.

Эффективны системы обнаружения боксования и юза с помощью датчиков скорости. Оборудование электровоза микропроцессорной системой управления интеграции подобных систем малозатратно.

Применение в качестве противобоксовочного средства песка приводит к быстрому засорению балластного слоя, требует сложной и дорогостоящей его очистки, увеличивает основное сопротивление движению. Поэтому предпочтительней использовать электрические средства повышения сцепления [9].

Улучшение тяговых свойств электровозов возможно за счет последовательно-независимого возбуждения тяговых двигателей. В качестве возбудителя целесообразно использовать статические полупроводниковые преобразователи.

В этом случае для согласования падения напряжения на обмотках возбуждения двигателей и напряжения контактной сети целесообразно использовать трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку. Выполнение вторичной обмотки трансформатора в виде двух секций, подключаемых соответствующими тиристорами выпрямительного моста к обмоткам возбуждения пары двигателей одной тележки, позволяет селективно изменять токи возбуждения соответствующих тяговых двигателей.

При увеличении тока подпитки возбуждения двигателя, вращающего колесную пару с нарушенным сцеплением, на 80 % относительно тока второго двигателя тележки сила тяги боксующей колесной пары снижается на 30 % (до уровня, соответствующего нормальным условиям сцепления) [10].

Импульсные методы регулирования ЭПС дают возможность изменять ток возбуждения I_B , ослабляя и усиливая его, за счет подпитки обмоток возбуждения током якорей I_A смежной параллельной группы тяговых двигателей (рисунок 7).

Величина коэффициента возбуждения β определяется выражением:

$$\beta = \frac{I_B}{I_A} = \frac{2 \cdot [R_1 \cdot (1 - \lambda) + R_2]}{R_1 \cdot (1 - \lambda) + R_2 + 4 \cdot R_B},$$

где R_1, R_2 – сопротивление первого и второго резисторов, Ом;

R_B – сопротивление обмотки возбуждения двигателя, Ом;

λ – коэффициент заполнения импульсного преобразователя VS1 [11].

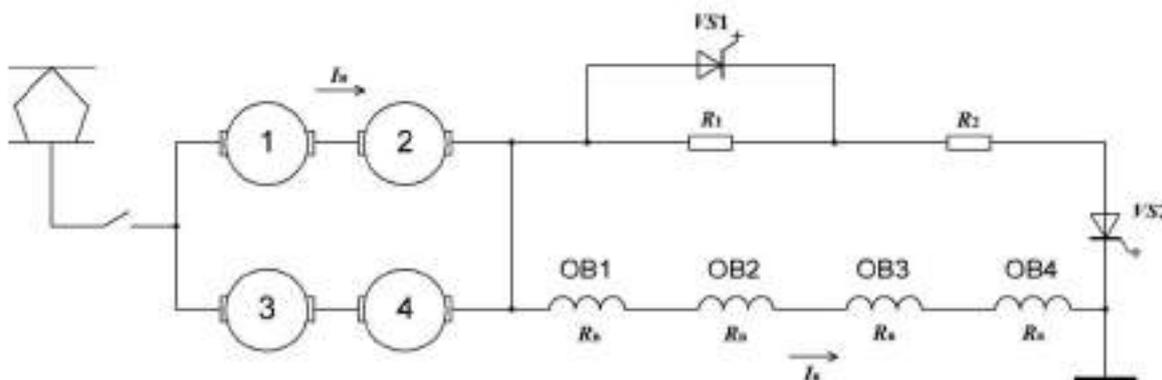


Рисунок 7 – Схема импульсного усиления возбуждения

При непроводящем состоянии импульсного преобразователя VS1 и включении полностью управляемого тиристора VS2 по обмоткам возбуждения OB1 – OB4 протекает сумма токов обеих групп обмоток якорей (1, 2 и 3, 4) и коэффициент возбуждения β равен максимальному значению 1,8 (так как часть тока двух ветвей тяговых двигателей протекает через резисторы R_1 и R_2). Тиристор VS2 обеспечивает защиту тяговых электродвигателей в нестационарных режимах работы. По мере роста тока якоря I_A коэффициент заполнения λ увеличивается вместе с уменьшением β , обеспечивая стабилизацию тока возбуждения I_B . При коэффициенте заполнения λ , равном единице, коэффициент β снижается до 0,84.

Полупроводниковая элементная база, применяемая на электрическом подвижном составе, и накопители энергии (аккумуляторы, конденсаторы и т. д.), которые в настоящее время используются для целей тяги, дают возможность совершенствовать тяговый привод с комбинированным или двойным питанием. Примером могут служить контактно-аккумуляторные

электровозы (ВЛ26), маневровые вагоны метрополитена, тепловозы, потребляющие энергию от контактной сети (ЭТГ001) или от второго автономного источника (ТЭМ9Н), и др.

На отечественных железных дорогах эксплуатируются электровозы двойного питания (ЭП10, ЭП20, 2ЭВ120, ВЛ82, ВЛ82М). Скорость коллекторных тяговых двигателей электровозов, эксплуатируемых на участках, электрифицированных на постоянном токе, регулируется с помощью пусковых резисторов. Для улучшения энергетических показателей системы регулирования целесообразно применить преобразователи постоянного-постоянного тока (DC-DC) понижающего или повышающего типа. В последнем случае преобразователь позволяет устранить непосредственную связь контактной сети и тяговых двигателей, что дает возможность оптимизировать их параметры и повысить уровень напряжения источника питания.

ЭПС с автономным источником питания (дизельный и газотурбинный генератор, накопители электрической или механической энергии) могут эксплуатироваться как на участках с напряжением питания 3 и 25 кВ, так и на неэлектрифицированных. На малодейственных участках железной дороги данный вид подвижного состава может применяться в качестве источника питания.

Полупроводниковые устройства дают возможность повысить эффективность электрического торможения и расширить диапазон регулирования скорости движения. Включение импульсного преобразователя между якорем и обмоткой возбуждения позволяет влиять на степень усиления (моторный режим) или ослабления (электрическое торможение) магнитного потока тягового двигателя, обеспечивая при этом электрическую устойчивость работы генератора с последовательным возбуждением [12]. За счет замены вращающегося преобразователя независимого питания обмоток возбуждения можно увеличить максимальный магнитный поток двигателя и скоростной диапазон применения рекуперативного торможения вместе со снижением эксплуатационных расходов на эксплуатацию электрооборудования. Применение импульсной рекуперации позволяет расширить зону рекуперации практически до полной остановки.

При всех преимуществах полупроводниковые приборы чувствительны к токам перегрузки и перенапряжениям, которые могут возникать при коммутации либо атмосферном воздействии, так как собственная способность *p-n*-переходов к рассеиванию энергии незначительна. Поэтому необходимо оборудовать ЭПС быстродействующими средствами защиты импульсных преобразователей.

Одним из возможных вариантов является устройство ограничения перенапряжений на конденсаторе входного фильтра, содержащее цепь из диода, резистора и тиристора, шунтирующую реактор фильтра в обратном направлении. Параллельно тиристорному подключены резистор и варистор, которые ограничивают перенапряжение до момента отпирания тиристора [13].

Дальнейшее повышение технико-экономических показателей ЭПС, оборудованного статическими полупроводниковыми преобразователями, идет по пути совершенствования систем управления. Современный уровень вычислительной базы (микропроцессоры и микроконтроллеры) позволяет реализовать алгоритмы управления высокой сложности и адаптивные системы на их основе.

Расширение функциональных возможностей систем управления и улучшение регулировочных свойств (точность, быстродействие и т. д.) могут быть достигнуты за счет использования искусственных нейронных сетей и регуляторов с нечеткой логикой, например, в замкнутых системах управления импульсными преобразователями в режимах пуска и электрического торможения тяговых двигателей ЭПС постоянного тока. Особенности таких систем является возможность контролировать параметры нагрузки цепи (напряжение, ток, частота, скорость).

Приведенный материал показывает возможность улучшения регулировочных свойств и технико-экономических показателей электровозов постоянного тока за счет внедрения полупроводниковых устройств с различной структурой силовой цепи.

Применение полупроводниковых приборов способствует снижению потерь энергии при пуске электровоза, повышению эффективности использования локомотива по сцеплению, расширению диапазона регулирования скорости за счет создания дополнительных естественных тяговых характеристик, повышению надежности и снижению массы и габаритов электрооборудования.

Полупроводниковые преобразователи могут применяться в качестве устройств согласования тягового электропривода и автономного источника питания в гибридных локомотивах, открывая возможность эксплуатации энергоэффективного подвижного состава на любых участках железной дороги.

Отмечена необходимость применения адаптивных систем управления импульсными преобразователями для реализации оптимальных параметров подвижного состава.

Список литературы

1. Некрасов, В. И. Импульсное управление тяговыми двигателями электрического подвижного состава постоянного тока: Учебник [Текст] / В. И. Некрасов / ЛИИЖТ. – Л., 1972. – 115 с.
2. Бакланов, А. А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А. А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2005. – № 6. – С. 32 – 35.
3. Бакланов, А. А. Влияние скорости движения на энергозатраты грузовых поездов [Текст] / А. А. Бакланов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 2 – 12.
4. Лисицын, А. Л. Тяговое обеспечение перевозочного процесса: Учебник [Текст] / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн. – М.: Интекст, 1996. – 158 с.
5. Курбасов, А. С. Тяговые возможности электровозов ВЛ10 можно улучшить [Текст] / А. С. Курбасов, Б. А. Курбасов // Локомотив: Массовый производственный журнал. – М. – 2004. – № 5. – С. 24 – 25.
6. Пат. 183291 Российская Федерация, МПК В 60 L 7/16. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава [Текст] / Мазнев А. С., Киселев А. А.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – № 2018105805; заявл. 15.02.2018; опубл. 17.09.2018, Бюл. № 26.
7. Баранов, В. А. Импульсное регулирование при последовательно-независимом возбуждении тяговых двигателей электровозов постоянного тока [Текст] / В. А. Баранов // Вестник ВЭЛНИИ / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск. – 2009. – № 2. – С. 187 – 194.
8. Есин, Н. В. Электронная селективная система защиты от боскования электровозов с зонно-фазным регулированием напряжения [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Есин Николай Васильевич. – Омск, 2000. – 170 с.
9. Режимы работы магистральных электровозов: Учебник [Текст] / О. А. Некрасов, А. Л. Лисицын и др. – М.: Транспорт, 1984. – 231 с.
10. А. с. 909783 СССР, МПК 5Н 02Р. Двухдвигательный электропривод [Текст] / Гиоргадзе Д. П., Колычев Г. К., Мазнев А. С., Путкарадзе Г. В., Чочели Ш. И.; заявитель и патентообладатель Ленинградский ин-т инж. ж.-д. трансп. – № 2955701; заявл. 09.07.1980; опубл. 28.02.1982, Бюл. № 8.
11. Тяговые электрические машины: Учебник [Текст] / В. Г. Щербаков, А. Д. Петрушин и др. / УМЦ ЖДТ. – М., 2016. – 614 с.
12. Мазнев, А. С. Определение пульсаций токов в тяговом двигателе с разделенными цепями якоря и возбуждения при импульсном регулировании [Текст] / А. С. Мазнев, В. И. Некрасов, Ю. С. Боголюбов // Известия вузов. Электромеханика / Новочеркасский политехн. ин-т. – Новочеркасск. – 1982. – № 5. – С. 536 – 539.

13. А. с. 984376 СССР, МПК 5Н 02Н. Устройство для защиты от перенапряжений цепей с индуктивностью [Текст] / Мазнев А. С., Шевцов Ю. А., Елсуков В. А., Червяков В. В. – № 2723622; заявл. 14.02.1979; опубл. 23.11.1981, Бюл. № 27.

References

1. Nekrasov V. I. *Impul'snoe upravlenie tyagovymi dvigatelyami ehlektricheskovo podvizhnoy sostava* (Electric traction DC motor pulse controlling). Leningrad: Leningrad Institute of Railway Transport Engineers, 1972, 115 p.
2. Baklanov A. A. Energy balance of motion for reducing energy consumption for traction of trains [Ehnergeticheskiy balans dvizheniya dlya resheniya zadach snizheniya raskhoda ehlektroenergii na tyagu poezdov]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transport: science, technology, management*. 2005, no. 6, pp. 32 – 35.
3. Baklanov A. A. Influence of speed on energy consumption of freight trains [Vliyanie skorosti dvizheniya na ehnergozatraty gruzovykh poezdov]. *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 1 (33), pp. 2 – 12.
4. Lisitsyn A. L., Muginsteyn L. A. *Tyagovoe obespechenie perevozhnoy protsessy* (Traction support of the transportation process). Moscow: Intekst, 1996, 158 p.
5. Kurbasov A. S., Kurbasov B. A. Traction capabilities of electric locomotives VL10 can be improved [Tyagovye vozmozhnosti ehlektrovozov VL10 mozno uluchshit']. *Lokomotiv – The locomotive: mass production journal*. 2004, no. 5, pp. 24 – 25.
6. Maznev A. S., Kiselev A. A. *Patent RU 183291 U1*, 15.02.2018.
7. Baranov V. A. Pulse control at serial-independent excitation of DC electric locomotives traction motors [Impul'snoe regulirovaniye pri posledovatel'no-nezavisimom vozbuzhdenii tyagovykh dvigateley ehlektrovozov postoyannogo toka]. *Vestnik VELNII – VELNII Messenger*, 2009, Is. 2, pp. 187 – 194.
8. Esin N. V. *Ehlektronnaya selektivnaya sistema zaschity ot boksovaniya ehlektrovozov s zonnophazovym regulirovaniem napryazheniya* (Electronic selective blocking protection system for electric locomotives with zone-phase voltage regulation). Candidate's thesis, Omsk, OSTU, 2000, 170 p.
9. Nekrasov O. A., Lisitsyn A. L., Muginsteyn L. A., Rakhamaninov V. I. *Rezhimy raboty magistral'nykh ehlektrovozov* (Main electric locomotives modes of operation). Moscow: Transport, 1984, 231 p.
10. Gyorgadze D. P., Kolychev G. K., Maznev A. S., Putkaradze G. V., Chocheli Sh. I. *Authorship certificate SU 909783 A1*, 09.07.1980.
11. Scherbakov V. G., Petrushin A. D., Khomenko B. I., Sedov V. I., Pakhominov S. A., Maznev A. S., Kolpachyan P. G. *Tyagovye ehlektricheskie mashiny* (Traction electric machines). Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport, 2016, 614 p.
12. Maznev A. S., Nekrasov V. I., Bogolyubov U. S. Determination of current pulsations in the traction motor with separated armature and field circuits with pulse regulation [Ohpredelenie pul'satsiy tokov v tyagovom dvigatele s razdelennymi tsepyami yakorya I vozbuzhdeniya pri impul'snom regulirovanii]. *Ehlectromekhanika – Electromechanics*, 1982, no 5, pp. 536 – 539.
13. Maznev A. S., Shevtsov Yu. A., Yelsukov V. A., Chervyakov V. V. *Authorship certificate SU 984376 A2*, 14.02.1979.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазнев Александр Сергеевич

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-85-36.

E-mail: maznev-as@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maznev Aleksandr Sergeevich

Emperor Aleksander I St. Petersburg State Transport University (PSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Professor of the department «Electric Traction», PSTU.

Phone: +7 (812) 457-85-36.

E-mail: maznev-as@mail.ru.

Киселев Александр Александрович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский пр., 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрическая тяга», ПГУПС.

Тел.: +7 (921) 411-53-06.

E-mail: akiselev1995@mail.ru.

Kiselev Aleksandr Aleksandrovich

Emperor Aleksander I St. Petersburg State Transport University (PSTU).

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

Postgraduate of the department «Electric Traction», PSTU.

Phone: +7 (921) 411-53-06.

E-mail: akiselev1995@mail.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мазнев, А. С. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока [Текст] / А. С. Мазнев, А. А. Киселев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 17 – 27.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Maznev A. S., Kiselev A. A. Improving the adjusting properties of DC electric rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no 37, pp. 17 – 27 (In Russian).

УДК 629.4

Н. И. Мануилов

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

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГЛАВНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЕЗДНЫХ ИСПЫТАНИЙ

***Аннотация.** Предметом исследования данной статьи является давление в главном резервуаре локомотива. Цель исследования – получить и проанализировать уникальные данные снижения давления в главном резервуаре локомотива. При проведении поездных испытаний разработанной автором системы диагностики тормозной сети поезда получены данные изменения давления в главном резервуаре локомотива в зависимости от управляющих воздействий машиниста в режиме реального времени. Достигнуто это с помощью установки датчика измерения давления в питательную магистраль локомотива и обработки данных с помощью программно-технического комплекса системы диагностики тормозной сети поезда. В работе применены методы математического анализа, метод эксперимента, аналитический метод. В результате работы описаны кривые снижения давления в соответствии с процессами, протекающими в главных резервуарах локомотива в процессе поездной работы. Произведено объяснение протекания пневматических процессов в соответствии с учетом специфики работы тормозного оборудования подвижного состава железных дорог. Произведен эксперимент замера плотности тормозной сети поезда машинистом и системы диагностики тормозной сети поезда, представлена сходимостъ результатов. Также определены количественные показатели скорости измерения штатным и предлагаемым способами. Результаты исследований применены для совершенствования методов и средств диагностики тормозной сети поезда, моделирования пневматических процессов тормозной системы поезда. Кривые снижения давления имеют свой газодинамический характер, позволяющий определять режим работы тормозной системы, а также осуществлять диагностику неисправностей тормозной сети поезда, таких как перекрытие концевых кранов, утечки в пути следования.*

***Ключевые слова:** главные резервуары, безопасность движения, плотность тормозной сети поезда, тормоза, эксперимент, система диагностики, изменение давления.*

Nikita I. Manuilov

Irkutsk State University of Railways (IRGUPS), Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF CHANGE OF PRESSURE IN THE MAIN RESERVES OF LOCOMOTIVE BASED ON THE RESULTS OF TRAIN TESTS

***Abstract.** The subject of this article is the pressure in the main reservoir of the locomotive. The purpose of the study is to obtain and analyze unique data on pressure reduction in the main reservoir of the locomotive. When carrying out train tests developed by the author of the train brake diagnostic system, pressure changes in the main reservoir of the locomotive were obtained depending on the driver's control effects in real time. This was achieved by installing a sensor measuring the pressure in the nutrient line of the locomotive and processing data using the software and hard-*

ware complex diagnostics system for the brake network of the train. In work methods of the mathematical analysis, a method of experiment, an analytical method are applied. As a result of the work, pressure reduction curves are described in accordance with the processes occurring in the main tanks of the locomotive during train operation. An explanation of the flow of pneumatic processes in accordance with the specifics of the braking equipment of the rolling stock of railways. An experiment was carried out to measure the density of the brake network of a train by a machinist and a system for diagnosing the brake network of a train, and the convergence of results was presented. Also, quantitative indicators of the measurement rate by the standard and proposed method are determined. The research results were applied to improve the methods and means of diagnosing the brake network of a train, modeling pneumatic processes of the train's brake system. Pressure reduction curves have their own gas-dynamic nature, which allows to determine the mode of operation of the braking system, as well as diagnose faults in the brake network of the train, such as shutting off end valves, leaks along the way.

Keywords: main tanks, traffic safety, train brake network density, brakes, experiment, diagnostic system, pressure change.

Повышение безопасности движения поездов является одной из приоритетных задач в компании Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», что неразрывно связано с общими результатами работы и структурными преобразованиями, которые реализуются на железнодорожном транспорте. В этой связи необходимо изобретать, модернизировать, совершенствовать не только тормозное оборудование, но и технологии его обслуживания, диагностики и ремонта [12].

С целью повышения безопасности движения и увеличения участковой скорости на сети железных дорог предложена система диагностики тормозной сети поезда (ТСП) [3, 10]. Сотрудниками кафедры «Электроподвижной состав» ИрГУПС совместно с Восточно-Сибирской дирекцией тяги и ООО «Локотех-Сервис» система диагностики ТСП установлена на электровозе серии 2ЭС5К № 085 (рисунок 1). Блок коммутации размещен в кабине с правой стороны от машиниста, блок индикации располагается на пульте управления машиниста [13].



Рисунок 1 – Общий вид системы диагностики ТСП в кабине электровоза 2ЭС5К «Ермак»

В процессе поездных испытаний произведена фиксация управляющих воздействий машиниста на пневматическую систему поезда с одновременным измерением системой диагностики ТСП изменения давления в главном резервуаре (ГР).

Проанализированы закономерности изменения давления в процессе управления автотормозами краном машиниста усл. № 395. На рисунке 2 изображены кривые изменения давления в ГР локомотива, записанные во время управления тормозами локомотива краном вспомогательного тормоза (КВТ) усл. № 215.

Управление пневматическими приборами локомотива отражается на изменении давления в главном резервуаре в виде параллельного нестационарного процесса, где 3 – кривая,

полученная без применения крана вспомогательного тормоза усл. № 215, характеризующая основной стационарный процесс, при котором падение давления происходит только за счет утечек из тормозной магистрали (ТМ) поезда и питательной магистрали (ПМ) локомотива. На кривой 1 изображено несколько ступеней торможения краном вспомогательного тормоза, где производится наполнение тормозных цилиндров (ТЦ) локомотива во II положении (0,1 МПа), через несколько секунд – в III положении крана вспомогательного тормоза (0,2 МПа) и переход к основному стационарному процессу. Далее производится отпуск крана вспомогательного тормоза до 0 МПа.

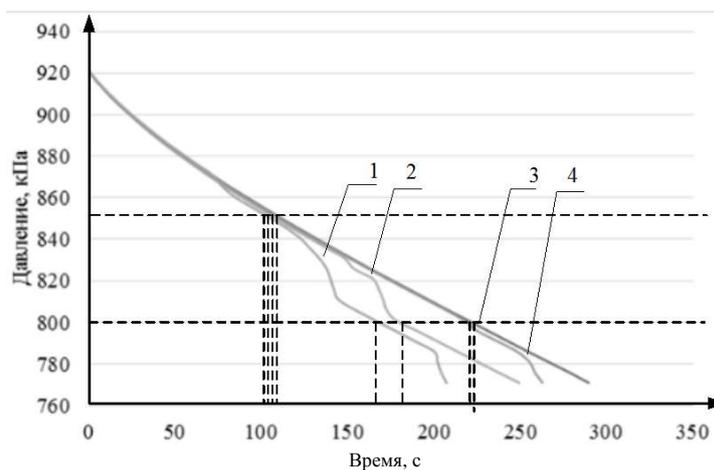


Рисунок 2 – График снижения давления в главном резервуаре локомотива от применения крана вспомогательного тормоза

Пневматический процесс 2 иллюстрирует применение крана вспомогательного тормоза до полной остановки в две ступени, где производится наполнение тормозных цилиндров локомотива во II положении (0,1 МПа), затем фиксация в V положении крана вспомогательного тормоза (0,4 МПа). На графике 3, представленном на рисунке 2, показано осуществление наполнения ТЦ локомотива давлением менее 0,1 МПа.

Таким образом, каждое торможение краном вспомогательного тормоза имеет характерные кривые, которые предложенная система диагностики при помощи статистических моделей может идентифицировать [11].

На рисунке 3 представлено два процесса: основной стационарный, связанный только с естественными утечками из ТМ поезда и ПМ локомотива, и основной нестационарный процесс, который включает в себя восполнение расхода воздуха из запасных резервуаров (ЗР) после торможения и который начинается в режиме отпуска тормозов. Оба графика – 1 и 2 на рисунке 3 – абсолютно идентичны до момента перевода управляющего органа крана машиниста усл. № 395 в положение отпуска, в котором наблюдается дополнительное экспоненциальное отклонение кривой ввиду расхода сжатого воздуха.

Если наложить все кривые во время осуществления основного нестационарного процесса по восстановлению давления в запасных резервуарах и камерах тормозных приборов, можно проследить закономерность уменьшения утечки по мере насыщения тормозной системы, которое заключается в наборе плавности фронта кривой.

На рисунке 4 видно, что на каждой кривой 1 – 6 скорость расхода воздуха снижается и в конечном счете устанавливается основной стационарный процесс. На данном графике изображен процесс «откачки» поезда, т. е. зарядка тормозной сети поезда сжатым воздухом из главных резервуаров локомотива. При зарядке тормозной магистрали поезда от локомотива в начале поездки среднее количество циклов откачки равно 5, что выяснено экспериментальным путем [5, 7]. На рисунке 5 изображен график изменения основного нестационарного процесса вследствие сокращения длины поезда. При перекрытии концевых кранов между вагонами основной стационарный процесс изменяет свою интенсивность, снижение давле-

ния в главных резервуарах увеличивается во времени, т. е. плотность поезда увеличивается. Во время эксперимента система диагностики тормозной сети поезда это зафиксировала и на блоке индикации появилось сообщение «Перекрытие». После перекрытия концевого крана был использован кран вспомогательного тормоза, что отразилось на кривой в виде расхода воздуха из главных резервуаров на восполнение утечек и увеличения времени снижения давления относительно кривой 2. При этом видно, что данному изменению предшествовало наложение кривых 2 – 4 при основном стационарном процессе до изменения длины поезда.

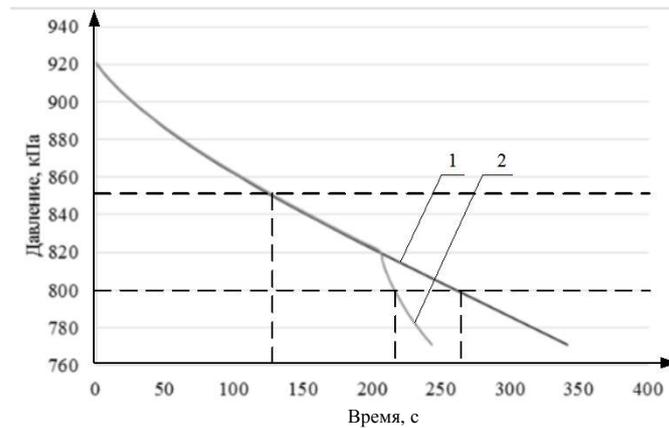


Рисунок 3 – График снижения давления в главных резервуарах локомотива от применения крана машиниста в режиме отпуска тормозов

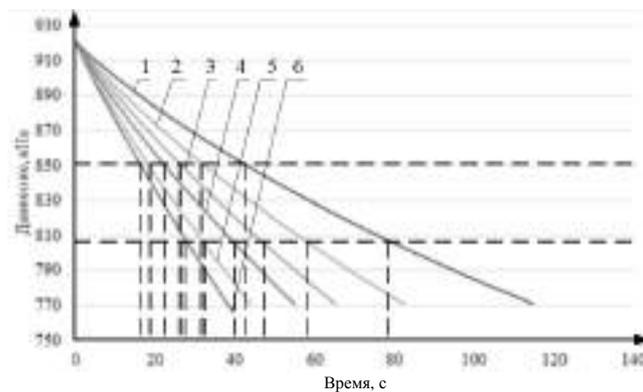


Рисунок 4 – График снижения давления в главных резервуарах локомотива при зарядке тормозной сети поезда сжатым воздухом из главных резервуаров локомотива

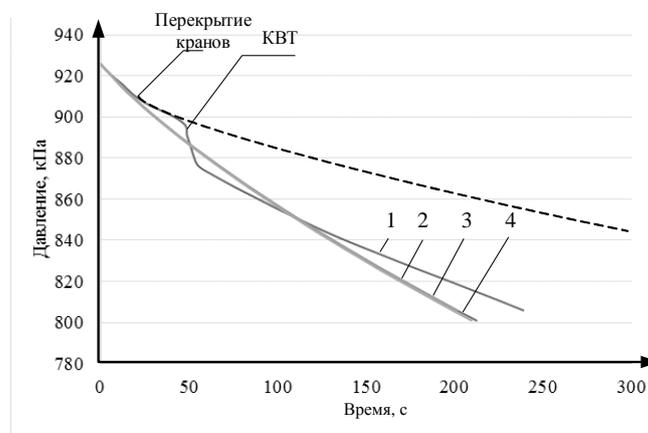


Рисунок 5 – График снижения давления в главных резервуарах локомотива при перекрытии кранов в поезде

Контрольные результаты замера плотности тормозной сети поезда, произведенные в течение шести поездок на участке Слюдянка – Иркутск-Сортировочный – Зима, в каждой по 15 измерений с помощью метода, регламентированного Правилами, представлены в таблице 1 и системой диагностики тормозной сети поезда в таблице 2 [9].

Таблица 1 – Результаты замеров плотности ТСП машинистом электровоза по манометрам и часам

| Номер замера | Значение плотности тормозной сети, с (1-й поезд) | Значение плотности тормозной сети, с (2-й поезд) | Значение плотности тормозной сети, с (3-й поезд) |
|--------------|--|--|--|
| 1 | 110 | 350 | 290 |
| 2 | 125 | 375 | 300 |
| 3 | 95 | 326 | 285 |
| 4 | 91 | 330 | 270 |
| 5 | 98 | 320 | 310 |
| 6 | 120 | 325 | 325 |
| 7 | 117 | 270 | 295 |
| 8 | 99 | 340 | 275 |
| 9 | 98 | 370 | 280 |
| 10 | 116 | 385 | 300 |
| 11 | 110 | 330 | 305 |
| 12 | 115 | 355 | 270 |
| 13 | 100 | 345 | 280 |
| 14 | 120 | 350 | 335 |
| 15 | 98 | 340 | 300 |

В таблице 2 представлены результаты эксперимента замера плотности тормозной сети поезда предлагаемым устройством.

Таблица 2 – Результаты замеров плотности тормозной сети поезда прототипом системы диагностики тормозной сети поезда

| Номер замера | Значение плотности тормозной сети, с (1-й поезд) | Значение плотности тормозной сети, с (2-й поезд) | Значение плотности тормозной сети, с (3-й поезд) |
|--------------|--|--|--|
| 1 | 100 | 357 | 282 |
| 2 | 99 | 355 | 281 |
| 3 | 99 | 355 | 285 |
| 4 | 97 | 340 | 277 |
| 5 | 98 | 360 | 280 |
| 6 | 105 | 350 | 282 |
| 7 | 103 | 355 | 290 |
| 8 | 99 | 355 | 295 |
| 9 | 98 | 340 | 293 |
| 10 | 105 | 352 | 293 |
| 11 | 103 | 355 | 290 |
| 12 | 99 | 355 | 291 |
| 13 | 99 | 350 | 287 |
| 14 | 98 | 357 | 285 |
| 15 | 98 | 355 | 280 |

Проверка сходимости экспериментальных данных, полученных при замере штатным способом (по манометру и часам), с данными, полученными предлагаемым устройством, заключается в вычислении коэффициента вариации. Коэффициент вариации характеризует относительную меру отклонения измеренных значений от среднеарифметического, и позволяет в полной мере оценить степень разбросанности значения исследуемого параметра плотности ТСП:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение;

\bar{x} – среднее арифметическое вариационного ряда.

Среднеквадратическое отклонение в полученных экспериментальных данных показывает абсолютное отклонение измеренных значений от среднеарифметического [11].

Для получения этого показателя по выборке используют формулу:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение результатов;

n – число измерений.

Для определения среднего арифметического значения используем формулу:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n}, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n x$ – сумма всех значений выборки;

n – объем выборки [8].

В таблице 3 представлены значения плотности ТСП, полученные при замере двумя способами с вычисленными относительными показателями меры разбросанности значений.

Таблица 3 – Значения плотности ТСП, полученные при замере двумя способами с вычисленными относительными показателями меры разбросанности значений

| Номер замера | Замер плотности машинистом | | | Замер плотности устройством | | |
|--------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | среднее арифметическое | среднеквадратическое отклонение | коэффициент вариации, % | средне арифметическое | среднеквадратическое отклонение | коэффициент вариации, % |
| 1 | 107,467 | 10,576 | 10 | 100,000 | 2,556 | 3 |
| 2 | 340,733 | 26,474 | 8 | 352,733 | 5,567 | 2 |
| 3 | 294,667 | 18,481 | 6 | 286,067 | 5,471 | 2 |

Среднее значение коэффициента вариации при замере штатным способом 9 %, а при замере новым способом – 2,6 %. Соответственно точность замера выше более чем в три раза. А время замера плотности тормозной сети поезда с использованием предложенного устройства более чем в 30 раз меньше.

В результате работы построены и приведены кривые изменения давления в главных резервуарах локомотива, полученные с помощью системы диагностики тормозной сети поезда. Данные кривые могут быть применены в моделировании и дальнейшем исследовании газодинамических процессов тормозной сети поезда. Измерение плотности тормозной сети поезда с использованием предлагаемого ускоренного замера позволяет с высокой точностью за минимальное время вычислить данный параметр. После вычисления и вывода на дисплей значения плотности тормозной сети поезда устройство производит диагностику тормозной сети поезда по характеру газодинамических процессов. По кривым снижения давления можно определять режим работы тормозной системы и осуществлять диагностику неисправностей тормозной сети поезда, таких как перекрытие концевых кранов, утечки в пути следования [3,10].

Список литературы

1. Иноземцев, В. Г. Автоматические тормоза [Текст] / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1981. – 464 с.

2. Иванов, П. Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах [Текст] / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 17 – 25.
3. Интеллектуальная система диагностики тормозной сети поезда [Текст] / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов и др. // Материалы V междунар. науч.-практ. конф. «Локомотивы. Транспортно – технологические комплексы. XXI век» / Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2017. – С. 346 – 350.
4. Мануилов, Н. И. Влияние человеческого фактора на надежность тормозного оборудования поезда [Текст] / Н. И. Мануилов // Мир транспорта. – 2017. – № 3 (70) – С. 196 – 204.
5. Мануилов, Н. И. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов [Текст] / Н. И. Мануилов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский // Наука вчера, сегодня, завтра. – 2016. – № 12 (34). – С. 48 – 57.
6. Мосолов, Д. Н. Учебное пособие по курсу «Электротехника и электроника» [Текст] / Д. Н. Мосолов / Московский гос. ун-т экономики, статистики и информатики. – М., 2008. – 195 с.
7. Основы технической диагностики [Текст] / Под ред. П. П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
8. Высшая математика для экономического бакалавриата: Учебник и практикум [Текст] / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко и др. – М.: Юрайт; 2012. – 909 с.
9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: Утверждены приказом Минтранса России от 21.12.2010. № 286 // СПС КонсультантПлюс (дата обращения: 11.09.2018 г.).
10. Интеллектуальная система диагностики тормозной сети поезда [Текст] / А. М. Худоногов, П. Ю. Иванов и др. // Известия Санкт-Петербургского ун-та путей сообщения / Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2018. – № 1. – С. 130 – 135.
11. Пат. 2662295 Российская Федерация, МПК 51 В 60 Т 17/22. Способ интеллектуальной диагностики тормозной сети поезда и устройство для его реализации [Текст] / Иванов П. Ю., Мануилов Н. И., Дульский Е. Ю.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – № 201613672/11; заявл. 16.09.2016; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 21.
12. Методика и техника поездных испытаний системы диагностики тормозной сети поезда на электровозе переменного тока 2ЭС5К [Текст] / А. М. Худоногов, Н. И. Мануилов и др. // Материалы девятой междунар. науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2018. – С. 300 – 304.

References

1. Inozemtsev V. G., Kazarinov V. M., Yasentsev V. F. *Avtomaticheskie tormoza* (Automatic brakes). Moscow: Transport, 1981, 464 p.
2. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I., Dulsky E. Yu. Causes of spontaneous triggering of auto brakes in freight trains [Prichiny samoproizvol'nogo srabatyvaniya avtotormozov v gruzovyh poezdah]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 17 – 25.
3. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I., Dulsky E. Yu., Khudonogov A. M. The intellectual system for diagnosing the brake network of a train [Intellektual'naya sistema diagnostiki tormoznoj seti poezda]. *Tezisy докладov Mezhdunarodnoi konferentsii «Materialy V mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Lokomotivy. Transportno – tekhnologicheskie komplekсы. XXI vek»»* (Materials of the V International Scientific and Technical Conference «Transport - technological complexes. XXI century: dedicated to the 180th anniversary of the railways of Russia»). St. Petersburg, 2017, pp. 346 – 350.

4. Manuilov N. I. The influence of the human factor on the reliability of the brake equipment of a train [Vliyanie chelovecheskogo faktora na nadezhnost' tormoznogo oborudovaniya poezda]. *Mir transporta – World of Transport*, 2017, no 3 (70), pp. 196 – 204.
5. Manuilov N. I., Ivanov P. Yu., Dul'sky E. Yu. Analysis of the influence of the human factor on the trouble-free operation of the brake equipment of trains [Analiz vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezotkaznyuyu rabotu tormoznogo oborudovaniya poezdov]. *Nauka vchera, segodnya, zavtra – Science yesterday, today, tomorrow*, 2016, no. 12-2 (34), pp. 48 – 57.
6. Mosolov D. N. *Uchebnoe posobie po kursu «EHlektrotekhnika i ehlektronika»* (The manual on the course «Electrical Engineering and Electronics»). Moscow: State University of Economics, Statistics and Informatics, 2008, 195 p.
7. Parkhomenko P. P., Karibsky V. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki* (Fundamentals of technical diagnostics). Moscow: Energy, 1976, 464 p.
8. Kremer N. Sh., Putko B. A., Trishin I. M., Fridman M. N. *Vysshaya matematika dlya ehkonomicheskogo bakalavriata : uchebnik i praktikum* (Higher Mathematics for Economic Baccalaureate: a textbook and practical work). Moscow: Publishing Yurayt, 2012, 909 p.
9. Pravila tekhnicheskoy ehkspluatacii zheleznyh dorog Rossijskoj Federacii (Rules of technical operation of railways of the Russian Federation), Moscow, Approved by order of the Ministry of Transport of Russia, 2010, no. 286.
10. Khudonogov A. M., Manuilov N. I., Ivanov P. Yu., Dul'sky E. Yu. Intelligent diagnostic system for the brake network of a train [Intellektual'naya sistema diagnostiki tormoznoj seti poezda]. *Izvestiia Petersburgskogo Transsiba – The journal of the St. Petersburg University of Communications*, 2018, no 1, pp. 130 – 135.
11. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dul'sky E.Yu. *Patent RU 2622295 C51 B60 T 17/22*, 03.19.2018.
12. Khudonogov A. M., Manuilov N. I., Ivanov P. Yu., Dul'sky E. Yu. Methodology and technique of train testing of the diagnostic system for the brake network of an alternating-current locomotive train 2ES5K [Metodika i tekhnika poezdnyh ispytanij sistemy diagnostiki tormoznoj seti poezda na ehlektrovoze peremennogo toka 2EHS5K]. *Materialy devyatoj mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* (Materials of the Ninth International Scientific and Practical Conference «Transport Infrastructure of the Siberian Region», Irkutsk, 2018, pp. 300 – 304.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мануилов Никита Игоревич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
ул. Чернышевского, д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: +7 (950) 38-93-559.
E-mail: nikita-manuilov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Manuilov Nikita Igorevich

Irkutsk State University of Railways (IRGUPS).
15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.
Postgraduate of the department «Electric rolling stock», IRGUPS.
Phone: +7 (950) 38-93-559.
E-mail: nikita-manuilov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мануилов, Н. И. Анализ изменения давления в главных резервуарах локомотива на основе результатов поездных испытаний [Текст] / Н. И. Мануилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 27 – 34.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Manuilov N. I. Analysis of change of pressure in the main reserves of locomotive based on the results of train tests. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 27 – 34 (In Russian).

УДК 629.423

Р. И. Устинов, О. В. Мельниченко

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

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ ОБРАЗОВАНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ИНВЕРТОРА ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. В статье представлен способ определения тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя (инвертора) электровоза, на которые пропущены импульсы управления. Способ основан на анализе длительности коммутации тока тиристорных плеч инвертора и скорости нарастания выпрямленного тока в цепи инвертора электровоза. Реализация способа осуществляется за счет доработки программного обеспечения микропроцессорной системы управления электровоза. Проведено имитационное моделирование электромагнитных процессов выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока серии ЗЭС5К «Ермак» в режиме рекуперативного торможения при аварийной работе на примере пропусков импульсов управления на тиристорные плечи VS2 и VS7. В результате моделирования получены данные, которые подтверждают эффективность предложенного авторами способа.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, электромагнитные процессы, выпрямительно-инверторный преобразователь, пропуск импульса управления, короткое замыкание, тиристорное плечо.

Roman I. Ustinov, Oleg V. Melnichenko

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

DEVELOPMENT OF EVALUATION METHOD OF FORMATION SHORT CIRCUIT IN THE POWER CIRCUITS OF THE INVERTER OF ELECTRIC LOCOMOTIVE

Abstract. The article presents a method for determining the thyristor shoulders of the rectifier-inverter converter (inverter) of an electric locomotive, on which the control pulses are passed. The method is based on the analysis of the duration of the current switching of the thyristors of the inverter shoulders and the rate of rise of the rectified current in the inverter circuit of the electric locomotive. The implementation of the method is carried out by refining the software of the microprocessor control system of the electric locomotive. The simulation of electromagnetic processes of rectifier inverter Converter of AC locomotive series 3es5k "Ermak" in the mode of regenerative braking during emergency operation is carried out on the example of missing control pulses on thyristor shoulders VS2 and VS7. As a result of modeling, data are obtained that confirm the effectiveness of the method proposed by the authors

Keywords: regenerative braking, electromagnetic processes, rectifier-inverter Converter, pass of impulse control, short-circuit, thyristor shoulder.

Одной из приоритетных задач, поставленных в Энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» до 2030 г., является повышение уровня рекуперированной энергии и эффективности ее использования [6]. Рекуперативное торможение является одним из основных энергосберегающих ресурсов на электроподвижном составе железных дорог, кроме того, оно обеспечивает высокую плавность хода поездов за счет регулируемого торможения в автоматическом режиме, значительно снижает продольно-динамические усилия в поезде, уменьшает износ колесных пар и тормозных колодок, повышает безопасность движения поездов.

Для сохранения преимуществ, которые дает рекуперативное торможение на электроподвижном составе переменного тока, необходима надежная работа выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИПа). Анализ характера и причин отказов электрического оборудования электровозов показал, что основная часть выходов из строя силовой части ВИПа происходит из-за неисправности электронных компонентов и сбоев в работе системы управления преобразователем. Большая часть таких отказов приводит к пропуску импульсов управления и выводу из строя тиристорных плеч ВИПа, что вызывает срывы режима рекуперативного торможения электровоза [2, 4, 5]. Резкая потеря тормозного эффекта электровоза и переход на пневматическое торможение приводят к образованию продольно-динамических

усилий в составе, которые способны вызвать сход подвижного состава с рельсовой колеи [2, 8]. Отсутствие резервного торможения (электрического) у электровоза является недопустимым как в пассажирском, так и в грузовом движении.

С целью решения этой проблемы авторами были разработаны способ повышения работоспособности ВИПа электровоза в режиме рекуперативного торможения и устройство для его реализации, которые позволяют исключить образование токов короткого замыкания в силовых цепях электровоза, возникающих при отказе одного из тиристорных плеч ВИПа электровоза, а также сохранить режим рекуперативного торможения электровоза [10]. Однако данное техническое решение требует установки дополнительных элементов в конструкцию преобразователя, осуществляющих обратную связь с блоком управления ВИПа, что усложняет техническую реализацию разработанного решения [1]. Поэтому перед авторами стояла задача – разработка способа определения пропусков импульсов управления на тиристоры плеч инвертора электровоза, который не требует установки дополнительного оборудования.

При штатной работе сигналы, пропорциональные длительности коммутации токов плеч инвертора, поступают с датчиков угла коммутации (ДУКов) в систему управления и служат для формирования импульсов, подаваемых на управляющие электроды тиристорных плеч инвертора. Авторами принято решение – использовать сигналы, пропорциональные длительности коммутации токов плеч ВИПа, для определения моментов пропусков импульсов управления, подаваемых на управляющие электроды тиристорных плеч ВИПа.

В качестве объекта исследования выбран ВИП грузового магистрального электровоза переменного тока серии ЗЭС5К «Ермак» в режиме рекуперативного торможения. ВИП позволяет осуществлять плавное зонно-фазовое регулирование напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД) электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения [7]. Работа преобразователя в режиме рекуперативного торможения осуществляется согласно алгоритму, представленному в таблице 1.

Таблица 1 – Штатный алгоритм управления ВИПа электровоза в инверторном режиме

| Зона регулирования | Направление ЭДС трансформатора | Алгоритм работы плеч инвертора | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|
| | | VS1 | VS2 | VS3 | VS4 | VS5 | VS6 | VS7 | VS8 |
| IV | → | – | β | α_p | – | – | – | β | – |
| | ← | β | – | – | α_p | – | – | – | β |
| III | → | – | – | – | β | α_p | – | β | – |
| | ← | – | – | β | – | – | α_p | – | β |
| II | → | – | β | α_p | – | β | – | – | – |
| | ← | β | – | – | α_p | – | β | – | – |
| I | → | – | – | – | α_p | α_p | – | – | – |
| | ← | – | – | α_p | – | – | α_p | – | – |

Блок-схема имитационной модели силовых цепей одной тележки электровоза ЗЭС5К (рисунок 1) включает в себя ВИП в режиме рекуперативного торможения с двумя параллельно подключенными к нему тяговыми электродвигателями (ТЭД), работающими в генераторном режиме, тяговый трансформатор (ТТ), блок управления ВИПа и блок пропуска сигналов управления [3, 11].

С целью исследования работы ВИПа в режиме рекуперативного торможения при отсутствии коммутации одного из тиристорных плеч преобразователя разработан «Блок пропуска сигналов управления». Данный блок позволяет в необходимый момент времени имитировать пропуски управляющих сигналов (β), подаваемых на тиристорные плечи VS 1...8

ВИПа, тем самым исследовать влияние отказа тиристорного плеча ВИПа на работу электровоза в режиме рекуперативного торможения.

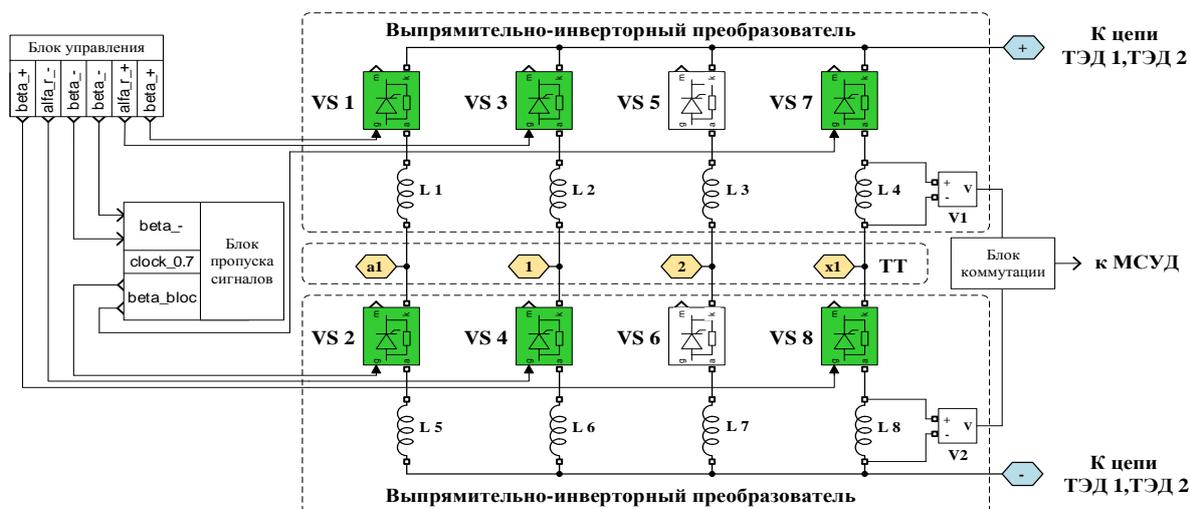


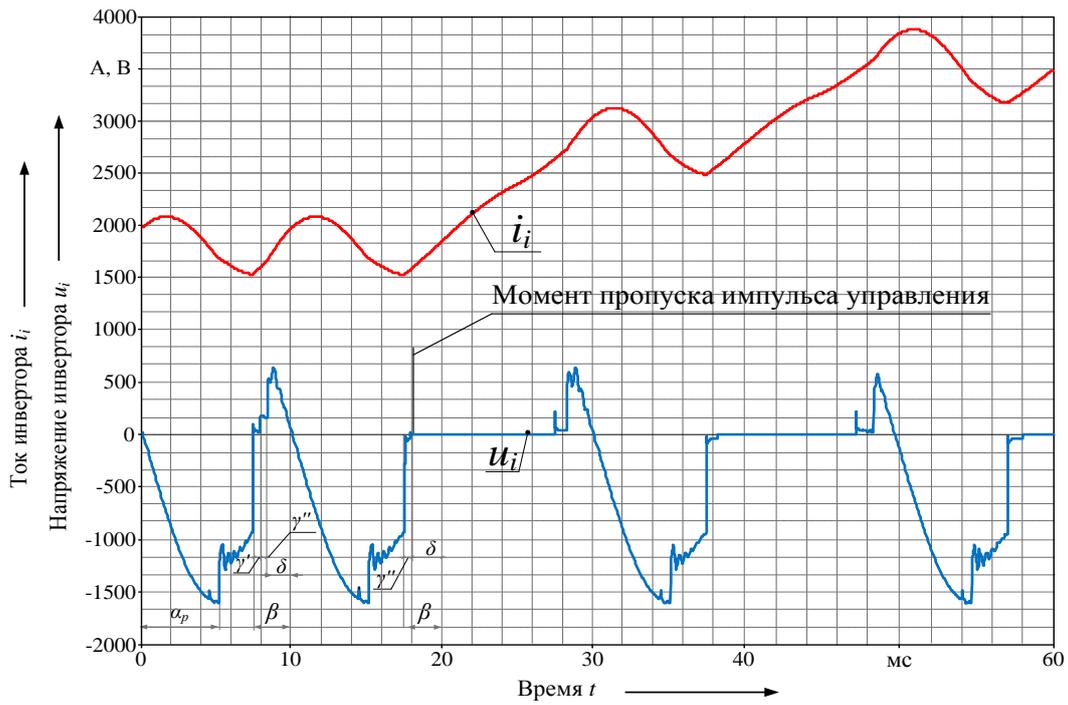
Рисунок 1 – Блок-схема имитационной модели силовых цепей одной тележки электровоза 3ЭС5К в редакторе Simulink

В ходе проведения экспериментов на имитационной модели осуществлялись пропуски импульсов управления β на тиристорные плечи VS2 и VS7 при работе ВИПа на примере IV зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения с разными значениями токов ТЭД электровоза [1]. При моделировании была выбрана IV зона регулирования напряжения ВИПа по причине протекания в силовых цепях электровоза максимального тока и прикладываемого максимального напряжения соответственно. В результате моделирования получены кривые токов и напряжений, представленные на рисунках 2 и 3.

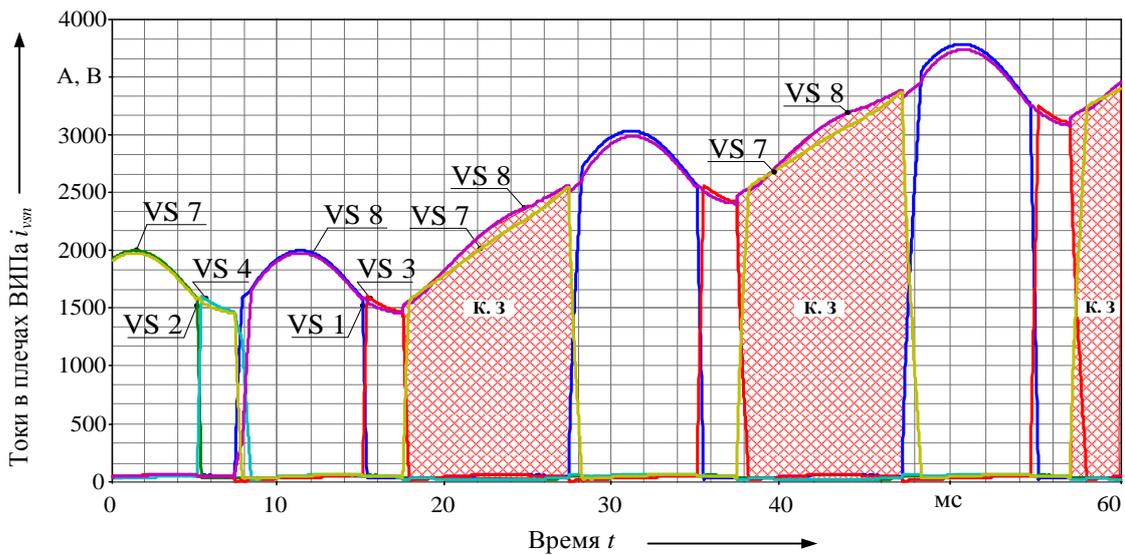
Рассмотрим более подробно полученные кривые. При пропуске управляющего импульса β на тиристорные плечи VS2 (см. рисунок 2) в следующий полупериод напряжения вторичной обмотки ТТ происходит образование короткого замыкания, что приводит к высокой интенсивности нарастания тока в силовых цепях электровоза. Через два периода величина тока достигнет уставки быстродействующих выключателей, что вызовет их срабатывание, вследствие чего процесс инвертирования будет сорван и электровоз резко потеряет тормозной эффект. Дальнейшее следование поезда будет осуществляться с применением только пневматического торможения. Отсутствие резервного (электрического) торможения на электроподвижном составе в значительной степени снижает безопасность движения поездов и является недопустимым.

При пропуске управляющего импульса β на тиристорное плечо VS7 (см. рисунок 3) в следующий полупериод напряжения вторичной обмотки ТТ происходит образование короткого замыкания генераторов, но не с начала полупериода, а с момента подачи импульса управления α_p . Через три периода величина тока также достигнет уставки быстродействующих выключателей, но в отличие от первого случая из-за образования короткого замыкания только после подачи импульса управления α_p интенсивность нарастания тока в цепи преобразователя будет меньше.

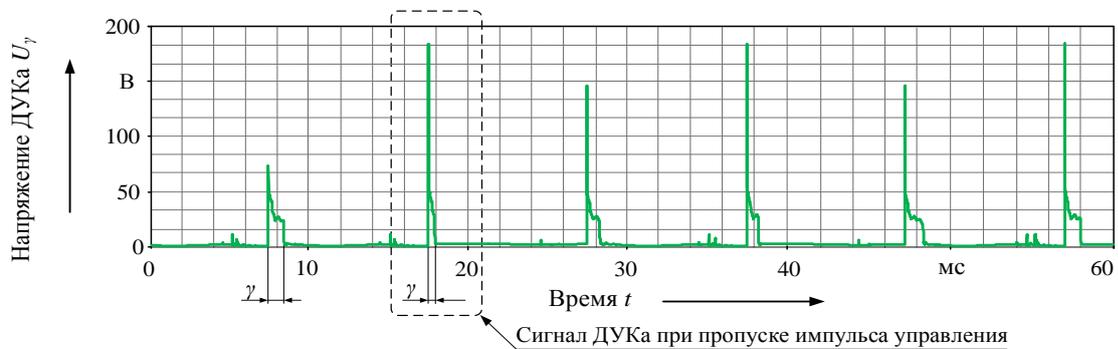
По результатам моделирования аварийных процессов инвертора электровоза при пропусках управляющих импульсов β на тиристорные плечи VS2 и VS7 были получены значения токов якорных обмоток ТЭД I_a , длительности коммутации тиристорных плеч инвертора γ и скорости нарастания тока якорей генераторов di_a/dt , А/мс, в аварийном и штатном режимах работы (таблица 2).



а



б



в

Рисунок 2 – Кривые, характеризующие электромагнитные процессы в инверторе электровоза при пропуске управляющего импульса на тиристорное плечо VS2

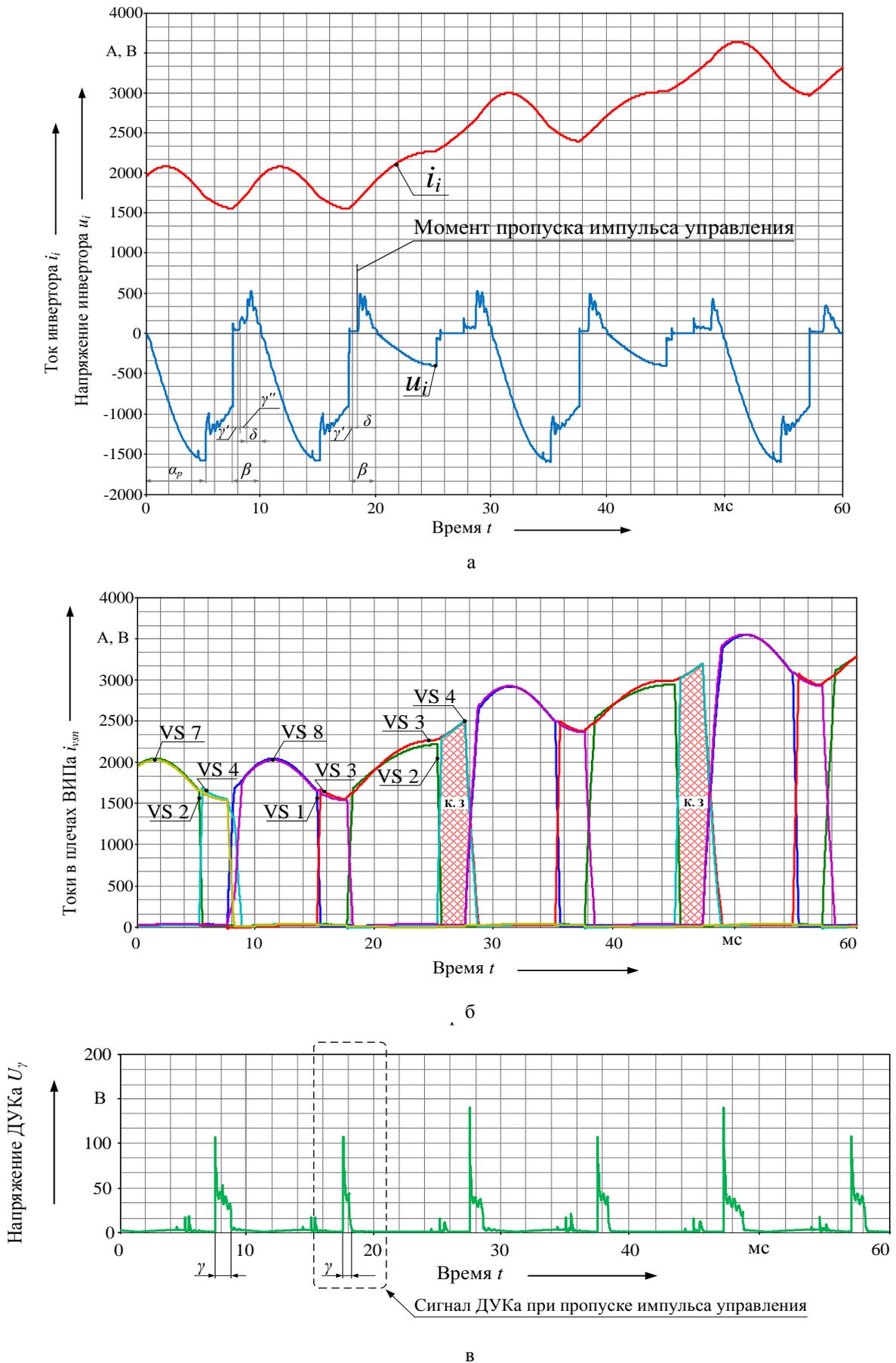


Рисунок 3 – Кривые, характеризующие электромагнитные процессы в инверторе электровоза при пропуске управляющего импульса на тиристорное плечо VS7

Таблица 2 – Данные сигналов ДУКа и датчиков тока якорей при типовой и аварийной работе инвертора электровоза переменного тока

| Ток инвертора I_i , А | Длительность коммутации γ , мс | | | Скорость нарастания тока инвертора di_a/dt , А/мс | | |
|----------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|---|-------------|-------------|
| | $\gamma = \gamma' + \gamma''$ (штатно) | $\gamma = \gamma''$ (отказ VS2) | $\gamma = \gamma'$ (отказ VS7) | (штатно) | (отказ VS2) | (отказ VS7) |
| | | | | | | |
| 300 | 0,53 | 0,18 | 0,28 | 31,68 | 112,1 | 79,21 |
| 350 | 0,55 | 0,2 | 0,3 | 30,05 | 114,6 | 80,97 |
| 400 | 0,57 | 0,21 | 0,31 | 28,43 | 116,7 | 81,64 |
| 450 | 0,6 | 0,24 | 0,35 | 27,25 | 118,2 | 82,44 |
| 500 | 0,63 | 0,27 | 0,38 | 27,01 | 120,3 | 83,01 |
| 550 | 0,66 | 0,29 | 0,41 | 26,81 | 121,5 | 83,95 |
| 600 | 0,71 | 0,31 | 0,43 | 25,9 | 122,1 | 84,31 |
| 650 | 0,76 | 0,35 | 0,48 | 26 | 122,9 | 85,94 |
| 700 | 0,83 | 0,38 | 0,52 | 26,62 | 123,3 | 86,04 |
| 750 | 0,89 | 0,43 | 0,6 | 27,27 | 124,8 | 87,03 |
| 800 | 0,96 | 0,49 | 0,67 | 28,01 | 125,91 | 88,4 |

На основании данных, полученных в ходе моделирования о длительности коммутации в аварийном и штатном режимах работы, построены графики зависимости тока инвертора от длительности коммутации (рисунок 4).

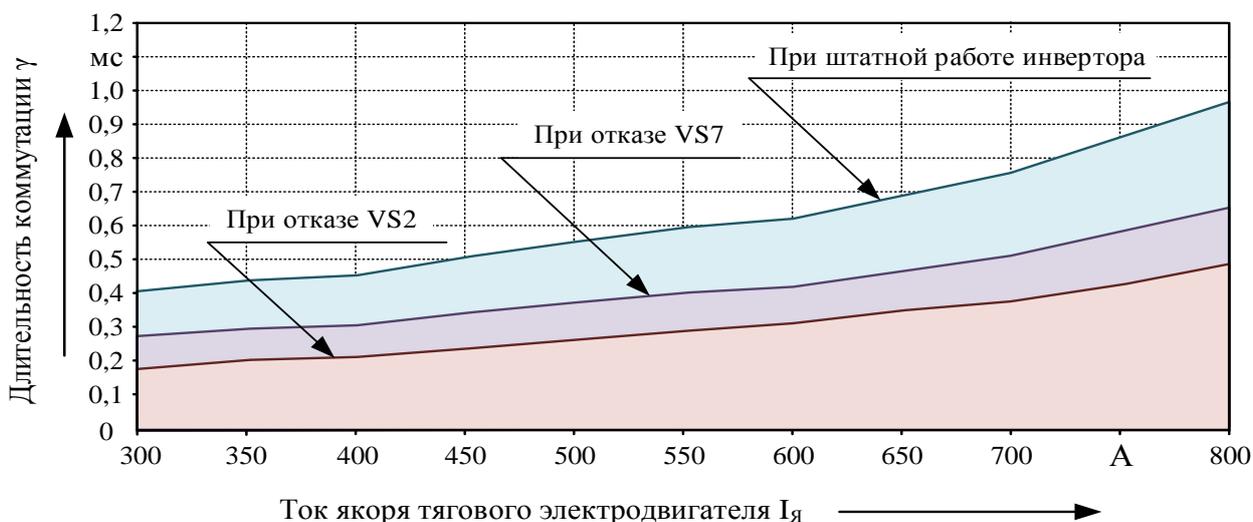


Рисунок 4 – Зависимость длительности коммутации от тока инвертора

В результате анализа длительности коммутации тока ВИПа электровоза установлено, что при аварийной работе преобразователя, вызванной пропуском импульса управления, происходит уменьшение длительности коммутации в два и более раза по сравнению с штатной работой [8, 9]. Исходя из этого определение пропуска импульса управления происходит согласно условию

$$\gamma_n \geq 2\gamma_{(n+1)}, \quad (1)$$

где γ_n – длительность коммутации предыдущего полупериода работы инвертора электровоза;

$\gamma_{(n+1)}$ – длительность коммутации текущего полупериода работы инвертора электровоза.

На основании данных, полученных в ходе математического моделирования о скоростях нарастания тока инвертора в штатном и аварийном режимах работы, построен график зависимости скорости нарастания тока инвертора от величины этого тока (рисунок 5).

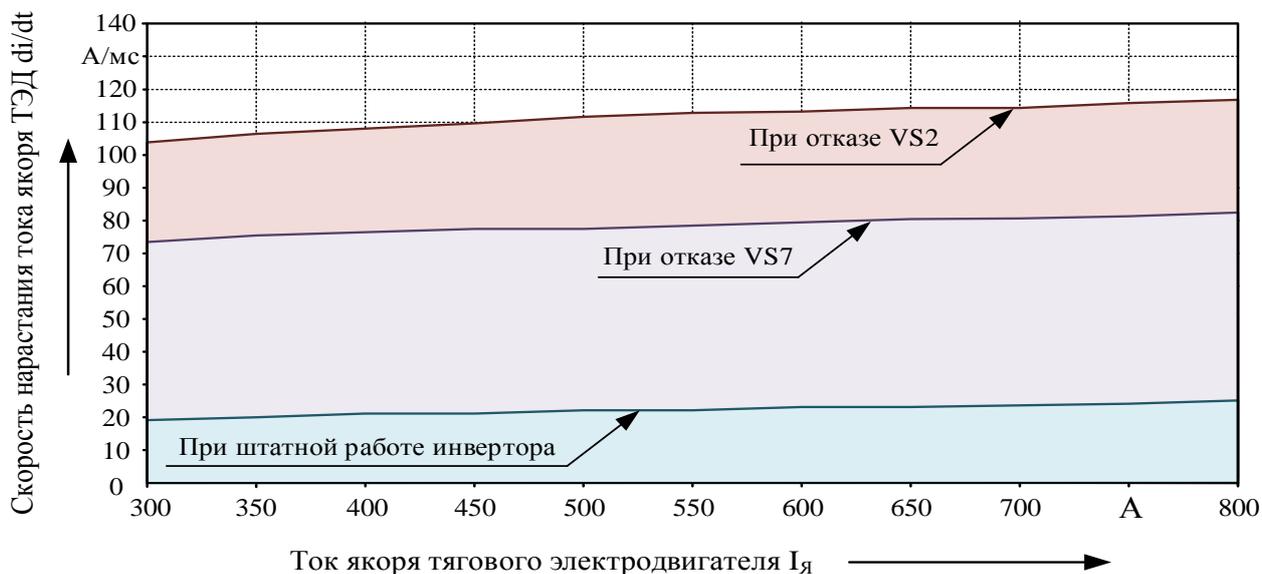


Рисунок 5 – Зависимость скорости нарастания тока якоря от его величины

В результате анализа скоростей нарастания токов инвертора электровоза установлено, что при аварийной работе преобразователя, вызванной отказом тиристорного плеча VS2, происходит резкое увеличение значения силы тока инвертора до 125,91 А/мс, которое в 4,5 раза превышает значение при штатной работе 28,01 А/мс. Однако при отказе тиристорного плеча VS7 происходит увеличение значения силы тока, но с меньшей интенсивностью – 88,4 А/мс, которое в 3,2 раза превышает значение при штатной работе 28,01 А/мс. Разность между скоростями нарастания тока предлагается использовать как критерий для определения отказавшего тиристорного плеча, т. е. после определения наличия отказа одного из плеч инвертора, необходимо сравнить скорости нарастания тока ВИПа согласно условию

$$\frac{di_g}{dt_{(n+1)}} \geq 3,5 \frac{di_g}{dt_n}, \quad (2)$$

где $\frac{di_g}{dt_{(n+1)}}$ – скорость нарастания тока инвертора в текущем полупериоде работы инвертора электровоза;

$\frac{di_g}{dt_n}$ – скорость нарастания тока инвертора в предыдущем полупериоде работы инвертора электровоза.

Если скорость нарастания тока инвертора текущего полупериода $\frac{di_g}{dt_{(n+1)}}$ превышает скорость нарастания тока инвертора в предыдущем полупериоде $\frac{di_g}{dt_n}$ в 3,5 раза и более, это говорит о том, что отказало тиристорное плечо, участвующее в большом контуре коммутации γ' ; если разность скоростей нарастания меньше чем в 3,5 раза, то отказало тиристорное плечо участвующее в малом контуре коммутации γ'' .

Предложенный способ оценки образования короткого замыкания позволит с достаточной точностью определить момент пропуска импульса управления на тиристоры плеч инвертора, тем самым предсказать образование режима короткого замыкания в силовых цепях электровоза. Данное техническое решение предлагается использовать для выявления тиристорных плеч инвертора электровоза, не принявших токовую нагрузку для их дальнейшего резервирования, тем самым исключая режим короткого замыкания и поддерживая силовые цепи электровоза в рабочем состоянии. Сохранение работоспособности электровоза в режиме рекуперативного торможения в значительной степени повышает безопасность движения поездов, сохраняет энергоэффективность пассажирских и грузовых электровозов переменного тока, повышает пропускную способность тяговых плеч при эксплуатации тягового электроподвижного состава.

Исследование проведено при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) в рамках договора № 2760ГСИ\43121 от 25.10.2018.

Список литературы

1. Skarpetowski G., Schaer R., Medricky K. *Patent DE 3601160-C2*, 22.10.1987.
2. Капустин, Л. Д. Обеспечение надежности системы управления электроподвижного состава с тиристорными преобразователями [Текст] / Л. Д. Капустин // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 1975. – № 2. – С. 5 – 9.
3. Мельниченко, О. В. Математическое моделирование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза в аварийных режимах типовым и предлагаемым способами управления [Текст] / О. В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – № 4 (40). – С. 229 – 233.
4. Мельниченко, О. В. Обеспечение работоспособности электровоза в режиме тяги при аварийных режимах выпрямительно-инверторного преобразователя [Текст] / О. В. Мельниченко / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2014. – 169 с.
5. Мельниченко, О. В. Аварийные процессы на первой зоне регулирования напряжения преобразователя электровоза переменного тока и обеспечение его работоспособности [Текст] / О. В. Мельниченко, С. В. Власьевский // Электрификация транспорта / Днепропетровский национальный ун-т ж.-д. трансп. им. академика В. Лазаряна. – Днепропетровск. – 2013. – № 6. – С. 101 – 112.
6. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2018. – 23 с.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): Руководство по эксплуатации [Текст] / Новочеркасский электровозостроительный завод. – Новочеркасск, 2007. – Т. 1, 635 с.; Т. 2, 640 с.
8. Потенциальные условия работы тиристорov в выпрямительно-инверторном преобразователе электровоза ВЛ80Р [Текст] / Б. Н. Тихменев, Ю. В. Басов и др. / Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М., 1984. – С. 9 – 20.
9. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрических железных дорог. Теория работы электрооборудования, электрические схемы и аппараты: Учебник [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1969. – 408 с.
10. Пат. 2659756 Российская Федерация, МПК В 60 L 9/12, В 60 L 7/16, Н 02 Р 7/295, Н 02 М 7/1555, В 60 L 2200/26. Способ повышения работоспособности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения и устройство для его реализации [Текст] / Устинов Р. И., Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г., Линьков А. О., Ягов-

кин Д. А.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2016146239; заявл. 24.11.2016; опубл. 03.07.2018, Бюл. № 19.

11. Устинов, Р. И. Моделирование аварийных процессов выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза при пропуске управляющих импульсов [Текст] / Р. И. Устинов, О. В. Мельниченко // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск. – 2018. – № 3. – С. 244 – 254.

References

1. Kapustin L. D. Ensuring the reliability of the control system of electric rolling stock with thyristor converters [Obespechenie nadyozhnosti sistemy upravleniya elektropodvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami]. *Vestnik VNIIZHT*. 1975, no. 2, pp. 5 – 9.

2. *EHlektrovoz magistral'nyj 2EHS5K (3EHS5K). Rukovodstvo po ehkspluatacii* (User manual. The mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K)), Novochoerkassk, 2007. – volume 1, 635 p., volume 2, 640 p.

3. *EHnergeticheskaya strategiya Holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 g.* (Energy strategy of the Holding «Russian Railways» for the period up to 2025 and for the future up to 2030), Moscow, Russian Railways, 2018, 23 p.

4. Melnichenko O. V. Mathematical modeling of electric locomotive rectifier-inverter converter in emergency modes with standard and proposed control methods [Matematicheskoe modelirovanie vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya ehlektrovoza v avarijnyh rezhimakh s tipovym i predlagaemym sposobami upravleniya]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2013, no. 4 (40), pp. 229 – 233.

5. Melnichenko O. V. *Obespechenie rabotosposobnosti ehlektrovoza v rezhime tyagi pri avarijnyh rezhimakh vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya* (Ensure the operability of the locomotive in the traction mode under emergency conditions, the rectifier-inverter converter). Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2014, 169 p.

6. Melnichenko O. V., Vlashevsky S. V. Emergency processes on the first zone of voltage regulation of the converter of the electric locomotive of alternating current and ensuring its operability [Avarijnye processy na pervoj zone regulirovaniya napryazheniya preobrazovatelya ehlektrovoza peremennogo toka i obespechenie ego rabotosposobnosti]. *Electrification of transport*, 2013, no. 6, pp. 101 – 112.

7. Skarpetowski G., Schaer R., Medricky K. *Patent DE 3601160 C2*, 22.10.1987.

8. Tikhmenov, Yu. V. Basov, V. V. Nakhodkin. Potential operating conditions of thyristors in rectifier-inverter Converter of electric locomotive VL80R [Potencial'nye usloviya raboty tiristorov v vypryamitel'no-invertornom preobrazovatele ehlektrovoza VL80R]. *Vestnik VNIIZHT*. 1984, pp. 9 – 20.

9. Tikhmenev B. N., Trachtman L. M. *Podvizhnoj sostav ehlektricheskikh zheleznykh dorog. Teoriya raboty ehlektrooborudovaniya, ehlektricheskie skhemy i apparaty* (Electric Rolling stock of Railways. Theory of electrical equipment, electrical circuits and devices). Moscow: Transport Publ, 1969, 408 p.

10. Ustinov R. I., Melnichenko O. V., Portnoy Y. A., Shramko S. G., Linkov A. O., Yagovkin D. A. *Patent RU 2659756 C2*, 03.07.2018.

11. Ustinov R. I., Melnichenko O. V. Modeling of emergency processes, rectifier-inverter converter locomotive with the pass of the control pulse [Modelirovanie avarijnyh processov vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelej ehlektrovoza pri propuske upravlyayushchih impul'sov]. *Bulletin of Irkutsk technical University*, 2018, no. 3, pp. 244 – 254.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Устинов Роман Иванович
Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.
Аспирант, учебный мастер кафедры «Электро-
подвижной состав», ИрГУПС.
Тел.: +7(924)820-93-53.
E-mail: romust93@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич
Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).
Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой «Электроподвижной состав», Ир-
ГУПС.
Тел.: +7(902)170-24-37.
E-mail: olegmelnval@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Устинов, Р. И. Разработка способа оценки обра-
зования короткого замыкания в силовых цепях инвер-
тора электровоза [Текст] / Р. И. Устинов, О. В. Мель-
ниченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т пу-
тей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). –
С. 35 – 44.

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Ustinov Roman Ivanovich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian
Federation
Graduate student, educational master of the de-
partment «Electric rolling stock», ISTU.
Phone: +7(924)820-93-53.
E-mail: romust93@mail.ru

Melnichenko Oleg Valeryevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian
Federation
Doctor of Technical Sciences, Professor, head of
department « Electric rolling stock», ISTU.
Phone: +7(902)170-24-37.
E-mail: olegmelnval@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ustinov R. I., Melnichenko O. V. Development
of evaluation method of formation short circuit in the
power circuits of the inverter of electric locomotive.
Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no
37, pp. 35 – 44 (In Russian).

УДК 629.423.31; 681.5.015.8

В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. Д. Галеев

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

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Статья посвящена вопросу повышения качества диагностирования технического состояния изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя постоянного тока с учетом ее частотных свойств, для этого сформирована схема замещения якорной обмотки, приведены результаты экспериментальных исследований частотных характеристик якорной обмотки как двухполюсника и установлены частотные зависимости полного, реактивного и активного сопротивления. С помощью методики синтеза реактивных двухполюсников показано формирование канонических схем Кауэра первого и второго рода, для которых определены численные значения параметров реактивных элементов. Рассмотрена зависимость между значениями элементов схем замещения и местом возникновения межвиткового замыкания с целью дальнейшего формирования диагностической модели на основе полученных результатов.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, синтез схемы замещения, обмотка якоря, двухполюсник, частотные характеристики.

Viktor V. Kharlamov, Pavel K. Shkodun, Albert D. Galeev
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DIAGNOSIS OF RAILWAY ROAD ENGINE TRACTION MOTOR ARMATURE WINDING TURN-TO-TURN INSULATION

Abstract. The article is devoted to the problem of improving the DC motor winding armature insulation technical condition diagnosing quality with regard to its frequency properties by forming the equivalent circuit of the electric motor rolling stock armature winding, which allows to determine the frequency numerical values of the parameters, the results of experimental studies of the armature winding oscillatory characteristics as a single-terminal pair are given; and the dependences of the impedance, reactance and active impedance are established. The dependences between equivalent circuits elements numerical values and turn-to-turn location for further formation diagnostic model based on the results.

Keywords: traction motor, equivalent circuit synthesis, armature winding, single-terminal pair, oscillatory characteristics.

Работоспособность современного тягового подвижного состава основана на поддержании технической готовности электровозов и их основных элементов – тяговых электрических двигателей (ТЭД). Своевременное и объективное выявление нарушений работы двигателей в процессе ремонта с помощью диагностических операций обеспечивает требуемый уровень надежности электровозов в эксплуатации. Несмотря на применение в процессе диагностирования современных технических и технологических решений и разработок актуальным остается вопрос повышения качества диагностирования. В настоящее время данные статистики по отказам электровозов серии 2ЭС6 локомотивного парка сети железных дорог России свидетельствуют о том, что ТЭД серий ЭДП-810, СТК-810, ЭК-810 подвержены выходу из строя по следующим причинам: пробой и межвитковые замыкания обмотки якоря, дополнительных полюсов, пробой изоляции на конус, неисправности коллекторно-щеточного узла и моторно-якорных подшипников [1]. Следовательно, актуальной задачей при техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава является повышение качества диагностирования ТЭД и его узлов, в том числе создание адекватных математических моделей и схем замещения якорной обмотки электродвигателя [2].

Основными критериями, предъявляемыми к методам технического диагностирования, являются достоверность, возможность применения безразборной неразрушающей процедуры контроля узла, технологическая простота и оперативность. На практике для оценки технического состояния якорной обмотки ТЭД применяются различные методы: импульсные (метод волнового отклика), синусоидального воздействия [3]. Импульсный метод заключается в подаче постоянного напряжения на обмотку электрической машины и дальнейшем анализе переходного процесса, возникающего при отключении источника от обмотки. На основании измеренной частоты колебаний и декремента затухания судят о наличии либо об отсутствии неисправности в виде короткого замыкания в обмотке. Отметим, что данный метод позволяет достоверно определить первый резонанс тока для обмотки, последующие же резонансные частоты установить затруднительно.

Одним из наиболее удобных методов для построения схемы замещения является метод воздействия синусоидального сигнала на якорную обмотку с целью получения резонансных кривых, характеризующих состояние межвитковой изоляции. Такой метод относится к неразрушающим, что позволяет сохранить ресурс изоляции якорной обмотки ТЭД для работы в режиме эксплуатации. Пробои изоляции приводят к изменению структуры лака, его коагуляции, и далее – к снижению качества изоляции, межвитковым замыканиям и локальному перегреву. Тепловое воздействие на якорную обмотку является одним из важнейших внешних факторов, поскольку превышение температуры на каждые 10 °С значительно снижает ресурс изоляции и приводит к возможному выходу двигателя из строя [1, 4, 6, 7].

Целью настоящей статьи является повышение достоверности диагностирования межвитковой изоляции якорной обмотки ТЭД подвижного состава за счет использования ее частотных свойств; формирование схемы замещения якорной обмотки, параметры которой позволяют оценивать ее техническое состояние.

При построении схемы замещения якорной обмотки следует учесть следующие особенности: анализируемая обмотка представляет собой фильтр нижних частот, в обмотке имеются распределенные индуктивные и емкостные элементы [5]; процесс диссипации энергии в

обмотке определяется наличием активных сопротивлений; следует создать схему замещения, приведя все распределенные параметры к сосредоточенным; необходимо предусмотреть возможность построения схемы замещения, позволяющей производить диагностирование, и определить диагностические критерии, которым будут соответствовать расчетные параметры элементов схемы замещения.

Для анализа частотных характеристик якорной обмотки ТЭД собрана схема испытаний, представленная на рисунке 1.

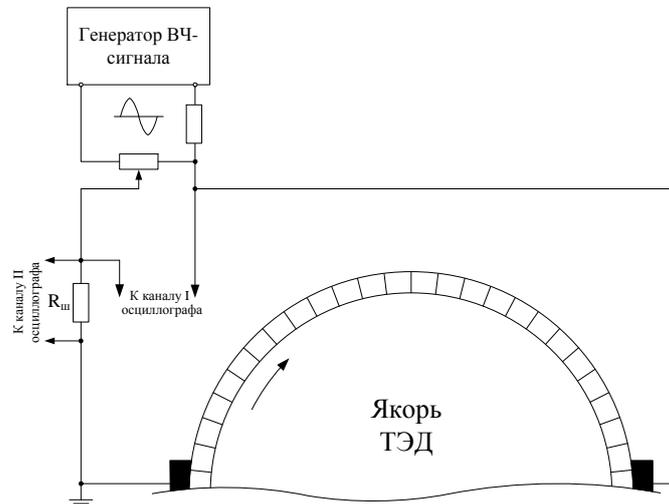


Рисунок 1 – Функциональная схема фиксации частотных характеристик якорной обмотки ТЭД

Указанная схема содержит высокочастотный генератор с регулируемым выходным делителем напряжения, токовый шунт и осциллограф, подключенные к исследуемой якорной обмотке ТЭД.

Измерения осуществляются следующим образом: устанавливается выходное напряжение генератора, фиксируются значения напряжения и тока с помощью осциллографа при изменении частоты выходного сигнала от минимального до максимального значения. Таким образом, фиксируются частотные зависимости напряжения $U(f)$, тока $I(f)$, определяется значение фазы $\varphi(f)$ для исследуемого частотного диапазона [3]. Полученные данные представляют собой амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, имеющие характерные точки, соответствующие частотам резонанса тока и напряжения, с помощью которых возможно построение эквивалентного двухполюсника якорной обмотки машины.

При варьировании частоты синусоидального сигнала исследуемая якорная обмотка представляет собой фильтр нижних частот, содержит параллельные и последовательные LC-контуры, имеет место наличие цепных схем и схем с распределенными параметрами, что определяется также и режимом подключения конца обмотки. При наличии изолированного конца у якорной обмотки наблюдаются свойства последовательного контура близ первого резонанса, при этом форма частотных характеристик совпадает с кривой колебательного контура [8]. Исходя из этого возможно формирование схемы замещения якорной обмотки как активно-реактивного двухполюсника, при этом резонансные частоты определяются значениями элементов схем замещения с учетом активной составляющей элементов схемы. Результаты экспериментальных исследований являются основой для создания схемы замещения, которая может быть реализована в виде канонических схем Фостера и Кауэра.

Для проведения экспериментальных исследований выбрано следующее оборудование: генератор высокочастотных колебаний Г4-153, двухканальный осциллограф *Rigol DS1052E*, токовый шунт. В качестве объекта исследования выбран ТЭД постоянного тока тепловоза 2ТЭ10Л.

В исследованиях, представленных в работе [9], установлено, что машина постоянного тока средней мощности и ТЭД имеют физическое подобие, следовательно, применяя теорию подобия и размерностей, результаты экспериментальных исследований, проведенных на машине средней мощности, допускается распространять на ТЭД. При этом некоторые параметры, например, численные значения резонансной частоты, амплитуда волнового отклика для ТЭД, будут иметь отличные от модельной машины значения, при этом суть физических процессов будет неизменна.

В процессе измерений фиксировались значения напряжения, тока и фазового сдвига между напряжением и током в диапазоне частот от 100 Гц до 10 МГц.

Частотные характеристики якорной обмотки, полученные в ходе экспериментов, представлены на рисунке 2. С целью синтеза схемы замещения якорной обмотки для получения значения полного сопротивления выполнено деление измеренного значения напряжения на соответствующий ток для каждой экспериментальной точки (графическая зависимость представлена на рисунке 3). Выделение реактивной и активной составляющих из совокупности полученных значений полного сопротивления осуществлялось по выражениям:

$$X_i = Z_i \cdot \sin \varphi_i \cdot \frac{\pi}{180}; \quad (1)$$

$$R_i = Z_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \frac{\pi}{180}, \quad (2)$$

где i – номер экспериментальной точки.

Поскольку синтезируемая схема замещения содержит активные и реактивные элементы, следует проанализировать и выделить из рассчитанного значения полного сопротивления активную и реактивную составляющие. Реактивная составляющая комплексного сопротивления двухполюсника определяется как произведение значения напряжения на ток и на синус угла сдвига фазы между ними, активная – соответствует произведению тех же величин на косинус соответствующего угла сдвига фаз. Выделенная из полного сопротивления реактивная составляющая комплексного сопротивления якорной обмотки ТЭД является ценной с диагностической точки зрения, поскольку она отражает наличие резонанса тока и напряжения и позволяет численно определить резонансные частоты. Эти данные отражают наличие неисправностей в обмотке и могут быть использованы как дополнение к импульсному методу диагностирования с целью повышения его достоверности.

Анализ данных на рисунках 3, 4 позволяет сделать вывод о существовании трех чередующихся по виду резонансах: первый наблюдается на частоте около 44 кГц – резонанс тока, при этом напряжение максимально, а ток минимален; второй – на частоте 152,4 кГц соответствует резонансу напряжения – здесь минимальное значение напряжения и максимальный ток; третий – на частоте 227,7 кГц соответствует резонансу тока. Подобный характер и наличие особых точек наблюдаются на частотных зависимостях полного и реактивного сопротивлений, что свидетельствует о наличии резонансов, при этом на графике реактивного сопротивления наблюдается изменение характера реактивности с емкостного на индуктивный и обратное изменение при прохождении точкой нуля. На основании приведенных экспериментальных данных выполнен синтез схемы замещения якорной обмотки и рассчитаны численные значения реактивных элементов схемы для канонической схемы Кауэра, активная составляющая сопротивления не учитывалась [10].

В ходе экспериментов установлено, что при введении неисправности на исследуемом участке цепи якорной обмотки ТЭД каждая из кривых напряжения, тока и фазы сдвигается в частотной области пропорционально месту возникновения этой неисправности, при этом характер полученных зависимостей остается прежним, изменяются лишь значения частот резонанса. Неисправности в виде межвиткового замыкания вносились на участке обмотки длиной l путем замыкания смежных коллекторных пластин между собой, при этом образовывались участки с пропорциональными длинами. Наибольшее отклонение резонансных частот

наблюдается при возникновении неисправности посередине цепи (в точке $l/2$), отображение максимального сдвига резонансных частот (частотные зависимости для данного случая обозначены пунктиром) представлено на рисунках 2 – 4.

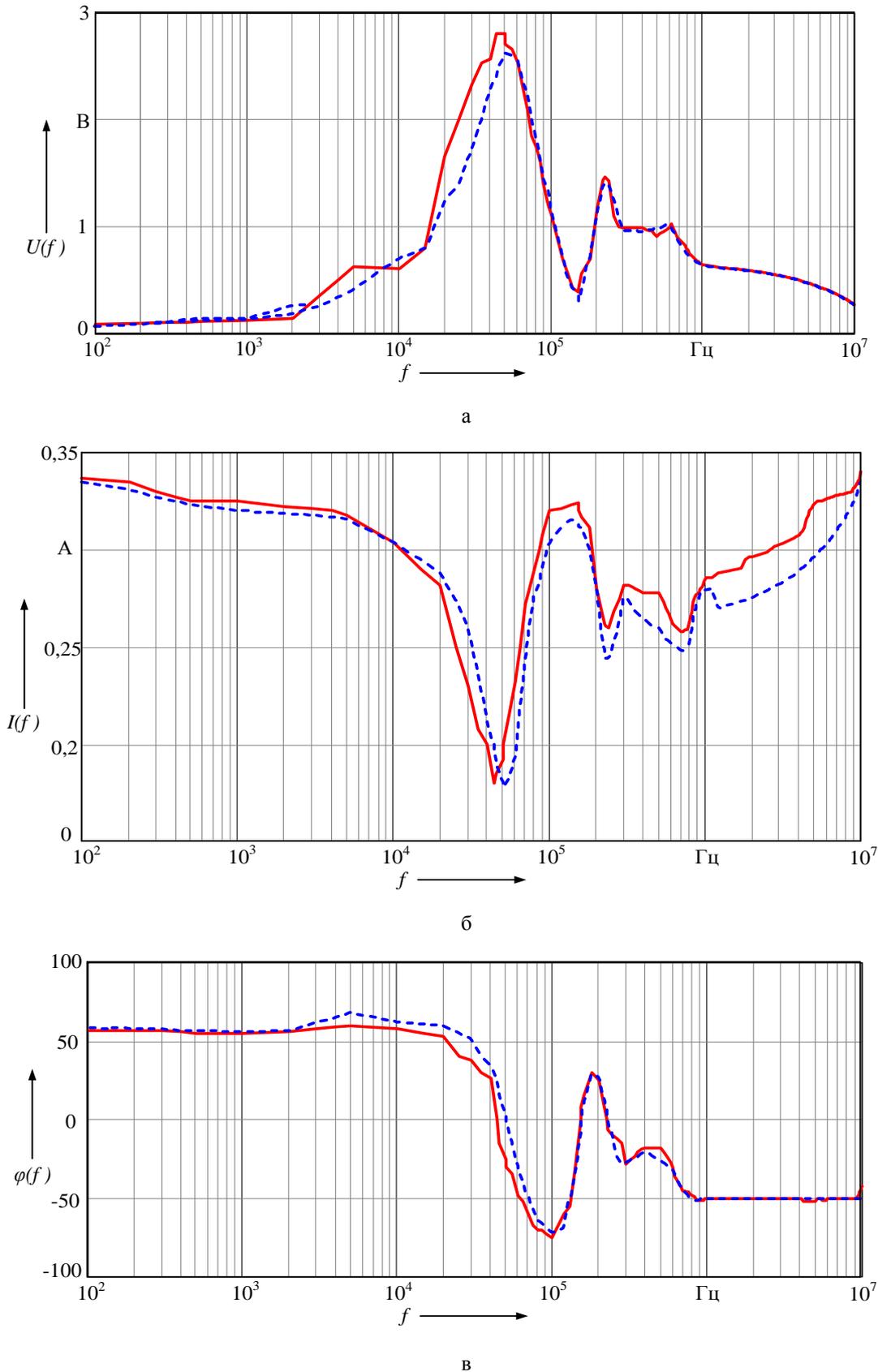


Рисунок 2 – Частотные характеристики якорной обмотки ТЭД

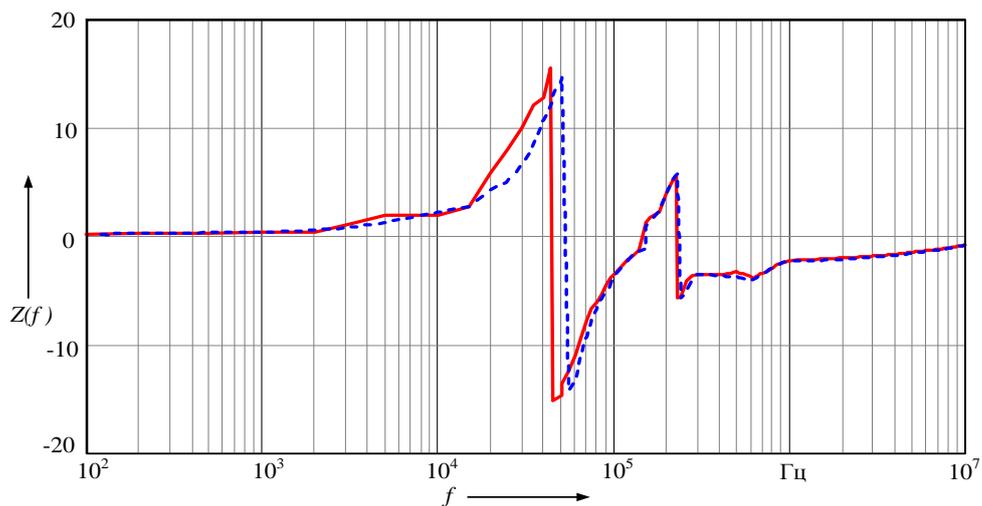
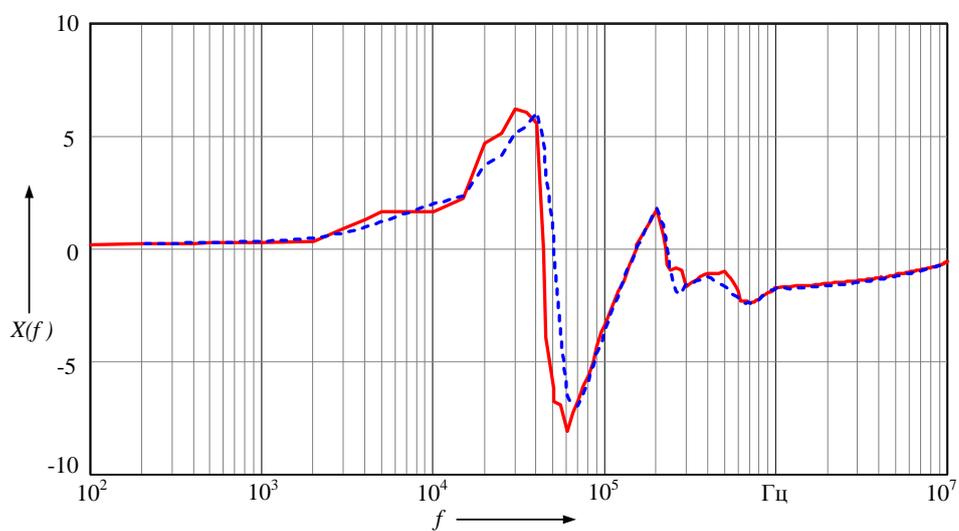
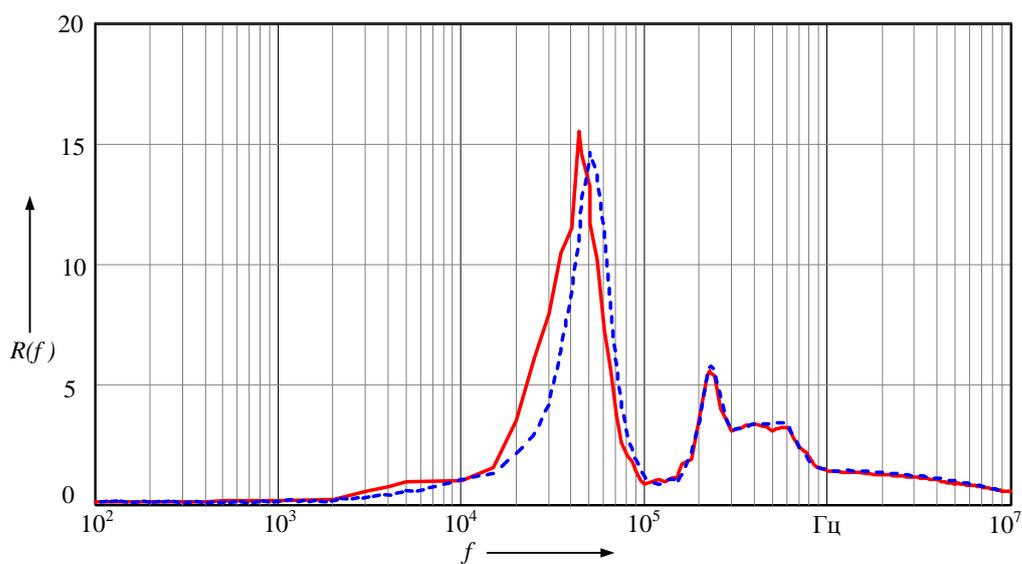


Рисунок 3 – Частотная зависимость полного сопротивления якорной обмотки ТЭД



а



б

Рисунок 4 – Зависимости реактивного (а) и активного (б) сопротивлений якорной обмотки

Расчет параметров элементов для канонической схемы Кауэра предполагает использование разложения полного сопротивления на цепные дроби. Учитывая, что количество резонансов в схеме равно трем, можно построить минимальный двухполюсник с количеством реактивных элементов на единицу больше, чем количество резонансов в схеме. Таким образом, в синтезируемой схеме будет содержаться четыре реактивных элемента. Анализ графика частотной зависимости позволяет сделать вывод о наличии внешних полюсов и определить класс двухполюсника – «нуль – нуль», при этом схема будет представлена в виде параллельного колебательного контура. Исходя из этих соображений на рисунке 5 представлены схемы замещения якорной обмотки в виде схем Кауэра первого и второго рода.

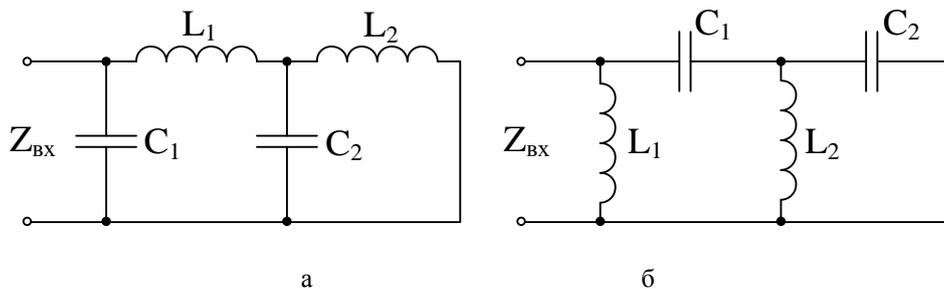


Рисунок 5 – Канонические схемы Кауэра для якорной обмотки ТЭД: а – первого рода; б – второго рода

Уравнение для частотной зависимости комплексного сопротивления двухполюсника класса «нуль – нуль» с четырьмя реактивными элементами и тремя резонансами имеет вид:

$$Z_{\text{вх}}(\omega) = -j\omega \cdot H \cdot \frac{(\omega^2 - \omega_3^2)}{(\omega^2 - \omega_2^2) \cdot (\omega^2 - \omega_4^2)}. \quad (3)$$

Выполним расчет безразмерного параметра H , отражающего состояние схемы для некоторой заданной частоты $\omega_{\text{зад}}$, для выполнения расчета используем частоту $\omega_{\text{зад}} = 30$ кГц:

$$H = \frac{Z_{\text{вх}}(\omega_{\text{зад}}) \cdot (\omega_{\text{зад}}^2 - \omega_2^2) \cdot (\omega_{\text{зад}}^2 - \omega_4^2)}{-j \cdot \omega_{\text{зад}} (\omega_{\text{зад}}^2 - \omega_3^2)}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{вх}}(\omega_{\text{зад}}) = 6,21$ Ом;

ω_2, ω_4 – круговые частоты, соответствующие резонансу тока;

ω_3 – круговая частота, соответствующая резонансу напряжения.

В результате проведенных вычислений определен параметр $H = 3,075 \cdot 10^6$. Перепишем для удобства записи выражение (4) в операторной форме:

$$Z_{\text{вх}}(p) = H \cdot \frac{(p^2 + p_3^2)}{(p^2 + p_2^2) \cdot (p^2 + p_4^2)}. \quad (5)$$

Подставим значения частот резонансов, параметра H и запишем выражение для входного сопротивления в операторной форме:

$$Z_{\text{вх}}(p) = \frac{3,075 \cdot 10^6 p^3 + 29,4462 \cdot 10^{11} p}{p^4 + 17,075 \cdot 10^5 p^2 + 3,956715 \cdot 10^{11}}. \quad (6)$$

Для определения численных значений элементов схемы замещения воспользуемся уравнением для входной проводимости цепи и выполним почленное деление полинома числителя на полином знаменателя.

Такое разложение для схемы Кауэра первого рода представлено на рисунке 6.

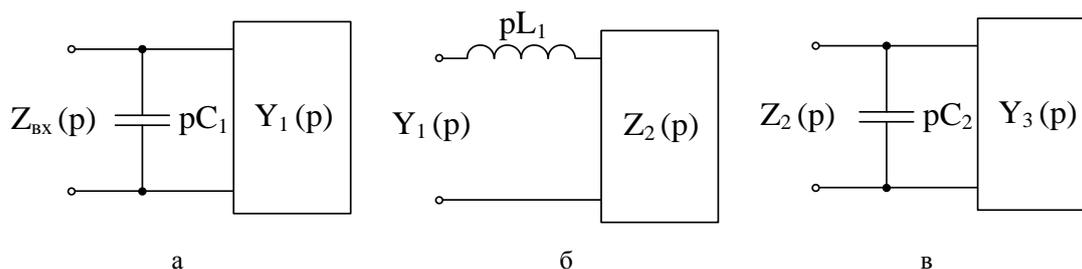


Рисунок 6 – Схема разложения входного сопротивления двухполюсника на цепные дроби

Аналитическая форма представления данного разложения представляется в виде математических выражений следующим образом:

$$Z_{\text{вх}}(p) = pC_1 + Y_1(p); \quad (7)$$

$$Z_1(p) = \frac{1}{Y_1(p)} = pL_1 + Z_2(p); \quad (8)$$

$$Y_2(p) = \frac{1}{Z_2(p)}; \quad (9)$$

$$Z_3(p) = \frac{1}{Y_3(p)} = pL_2. \quad (10)$$

Расчет параметров схемы замещения при сохранении характера резонансных процессов, происходящих в цепи, и, соответственно, ее конфигурации произведен для якорной обмотки ТЭД с введенной неисправностью с целью исследования изменения параметров схемы в данном случае.

Результат разложения и определения параметров схемы замещения для схемы Кауэра первого и второго рода представлен в таблице для двух исследуемых состояний цепи. Оценка адекватности полученной математической модели производилась для значений резонансных частот и подтвердила корректность полученного решения (отклонение экспериментальных и расчетных значений резонансных частот не превысило 5 %). В дальнейших исследованиях и для процесса диагностирования следует воспользоваться наиболее рациональной схемой замещения, позволяющей интерпретировать значения элементов с точки зрения физики процесса.

Расчитанные значения элементов схем замещения Кауэра

| Каноническая схема | Кауэра I рода | | | | Кауэра II рода | | | |
|------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | L_1 , Гн | C_1 , Ф | L_2 , Гн | C_2 , Ф | L_1 , Гн | C_1 , Ф | L_2 , Гн | C_2 , Ф |
| Состояние | Номинал элемента схемы замещения | | | | | | | |
| Исправное | $0,255 \cdot 10^{-5}$ | $0,325 \cdot 10^{-6}$ | $1,546 \cdot 10^{-5}$ | $0,498 \cdot 10^{-6}$ | $1,801 \cdot 10^{-5}$ | $0,693 \cdot 10^{-6}$ | $0,084 \cdot 10^{-5}$ | $0,612 \cdot 10^{-6}$ |
| Замыкание в точке I/5 | $0,316 \cdot 10^{-5}$ | $0,26 \cdot 10^{-6}$ | $1,67 \cdot 10^{-5}$ | $0,406 \cdot 10^{-6}$ | $1,988 \cdot 10^{-5}$ | $0,547 \cdot 10^{-6}$ | $0,103 \cdot 10^{-5}$ | $0,495 \cdot 10^{-6}$ |
| Замыкание в точке 2I/3 | $0,37 \cdot 10^{-5}$ | $0,219 \cdot 10^{-6}$ | $1,736 \cdot 10^{-5}$ | $0,353 \cdot 10^{-6}$ | $2,105 \cdot 10^{-5}$ | $0,458 \cdot 10^{-6}$ | $0,123 \cdot 10^{-5}$ | $0,419 \cdot 10^{-6}$ |
| Замыкание в точке I/2 | $0,378 \cdot 10^{-5}$ | $0,212 \cdot 10^{-6}$ | $1,741 \cdot 10^{-5}$ | $0,344 \cdot 10^{-6}$ | $2,118 \cdot 10^{-5}$ | $0,449 \cdot 10^{-6}$ | $0,126 \cdot 10^{-5}$ | $0,408 \cdot 10^{-6}$ |

При внесении неисправности в якорную обмотку ТЭД изменяются значения номиналов элементов схемы замещения, при этом замечены рост каждой из элементарных индуктивностей и, напротив, снижение значения каждой из элементарных емкостей схемы замещения. В ходе экспериментальных исследований при изменении местоположения точки внесения неисправности в исследуемую цепь обмотки якоря наблюдалась установленная теоретически тенденция к изменению номиналов данных элементов схемы, следовательно, имеется зависимость между параметрами элементов схемы замещения и пространственной координатой точки возникновения межвиткового замыкания.

В результате проведенных исследований сформирована схема замещения якорной обмотки ТЭД в виде канонической схемы Кауэра первого и второго рода, позволяющая создать адекватное диагностическое средство для идентификации неисправности. В разработанной схеме замещения отражены основные частотные свойства исследуемой якорной обмотки, а дальнейшее совершенствование схемы предполагает уточнение параметров элементов схемы, введение активной составляющей и элементов со взаимной индуктивностью с целью обнаружения места возникновения неисправности. Численные значения элементов сформированной схемы замещения якорной обмотки могут быть скорректированы для конкретного типа электродвигателя путем экспериментального получения частотных характеристик. Значения частоты и характера изменения сопротивления позволяют повысить эффективность и достоверность диагностирования при определении технического состояния якорной обмотки ТЭД локомотива.

Список литературы

1. Шестаков, И. В. Совершенствование технологии диагностирования изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Шестаков Игнат Валентинович. – Омск, 2017. – 19 с.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга» / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 63 с. Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf, свободный. (Дата обращения: 21.03.2018).
3. Харламов, В. В. Применение методики волнового отклика для контроля технического состояния изоляции якорных обмоток машин постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 79 – 86.
4. Williamson S. J., Wrobel R., Booker J. D., Yon J., PMellor Williamson. H., S. Effects of Insulation Ageing on the Conductive Heat Transfer from the Winding Body into Machine Periphery. Stator Core Pack. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, 2016. 1 – 6 pp.
5. Jun Zhang, Weijie Xu , Chuang Gao , Shuhong Wang , Jie Qiu , Jian Guo Zhu, Youguang Guo Analysis of Inter-Turn Insulation of High Voltage Electrical Machine byUsing Multi-Conductor Transmission Line Model. *IEEE transaction on magnetics*. 2013. vol. 49, № 5. pp. 1905 – 1907.
6. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса [Текст] / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия ТПУ / Томский политехнический ун-т. – Томск. – 2005. – № 7. – С. 156 – 159.
7. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины [Текст] / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1990. – 401 с.

8. Бессуднов, Е. П. Обнаружение мест дефектов изоляции обмоток электрических машин постоянного тока [Текст] / Е. П. Бессуднов. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
9. Харламов, В. В. Применение теории подобия при моделировании износа коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4 (8). – С. 57 – 62.
10. Основы теории цепей: Учебник [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

References

1. Shestakov I. V., *Sovershenstvovanie tehnologii diagnostirovaniya izolyacii tyagovih elektrodvigatelej podvizhnogo sostava* [Enhancement of rolling stock electric machines insulation diagnosis technology] Synopsis of Ph.D thesis. Omsk, 2017. – 19 p.
2. *Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya holdinga «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaya kniga»* [The strategy of scientific and technological development of the holding «Russian Railways» for the period up to 2020 and to the perspective up to 2025. «White paper»] http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf
3. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Shestakov I. V. Application of wave response technique for DC machines anchor windings insulation technical condition controlling [Primenenie metodiki volnovogo otklika dlya kontrolya tehniceskogo sostoyaniya izolyacii yakornyh obmotok mashin postoyannogo toka] *Innovatsionnye proekty i tehnologii mashinostroitel'nyh proizvodstv: materialy vsrossijskoj nauchno-tekhniceskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Omsk, 2015, pp. 79 – 86.
4. Williamson S. J., Wrobel R., Booker J. D., Yon J., PMellor Williamson. H., S. Effects of Insulation Ageing on the Conductive Heat Transfer from the Winding Body into Machine Periphery. Stator Core Pack. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, 2016. 1 – 6 pp.
5. Jun Zhang, Weijie Xu , Chuang Gao , Shuhong Wang , Jie Qiu , Jian Guo Zhu, Youguang Guo Analysis of Inter-Turn Insulation of High Voltage Electrical Machine by Using Multi-Conductor Transmission Line Model. *IEEE transaction on magnetics*. 2013. vol. 49, № 5. pp. 1905 – 1907.
6. Sherbatov V. V. Simulation of the thermal state of the traction motor to predict the resource [Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tiagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa]. *Izvestiia TPU*, №7, 2005, pp. 156 – 159.
7. Bruskin D. E. Zorohovich A. E., Hvostov V. S. *Elektricheskie mashiny i mikromashiny* (Electrical machines and micromachines). Moscow: Higher School, 1990, 401 p.
8. Bessudnov E. P. *Obnaruzhenie mest defektov izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin postoyannogo toka* (Detection of DC electric machines winding insulation defects). Moscow: Energy, 1977, 120 p.
9. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Dolgova A. V. Application of similarity theory for modeling traction motor collector-brush wear [Primenenie teorii podobiya pri modelirovanii iznosa kollektorno-shhetochного узла тягового электродвигателя]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2011, no. 4, pp. 57 – 62.
10. Zevеке G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strahov S. V. *Osnovy teorii tsepej* [Fundamentals of chains theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 528 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: emoe@omgups.ru

Галеев Альберт Дамирович

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 (3812) 37-60-82.

E-mail: emoe@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Диагностирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя магистральных локомотивов [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. Д. Галеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 44 – 54.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Viktor Vasilievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx pr., Omsk, 644046, the Russian Federation. Doctor in Engineering, Head of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: emoe@omgups.ru

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D in Engineering, Associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: emoe@omgups.ru

Galeev Albert Damirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov, V. V. Diagnosis of interturn insulation of the anchor winding of the traction motor of main-line locomotives / V. V. Kharlamov, P. K. Shkodun, A. D. Galeev. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no 37, pp. 44 – 54 (In Russian).

УДК: 621.311.026.5.076.12

В. Т. Черемисин, А. В. Никонов

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

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ОСНОВНОМ ОБОРУДОВАНИИ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ С УЧЕТОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ПУТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Аннотация. С целью обеспечения пропускной способности на Западно-Сибирской железной дороге широко внедряются регулируемые устройства компенсации реактивной мощности. Схемное построение и параметры таких устройств значительно различаются. В связи с этим необходимо выбрать наиболее эффективное устройство, отвечающее конкретным технико-экономическим условиям. В статье выполнена оценка потерь мощности в основном оборудовании двух статических тиристорных компенсаторов разных производителей, установленных на постах секционирования Аламбай и Новая Дубрава Западно-Сибирской железной дороги. Рассчитаны потери мощности в оборудовании с учетом дополнительных потерь от влияния высших гармонических составляющих. Проведен анализ схемного построения обоих устройств с точки зрения снижения потерь. Построены зависимости потерь мощности в их элементах от генерируемой реактивной мощно-

сти и тока тиристорно-реакторной группы. Приведены вероятностные функции распределения тока тиристорно-реакторных групп устройств при заданных уставках. Представлены результаты измерений расхода электропотребления устройств на собственные нужды. Сопоставлен эффект снижения потерь мощности в тяговой сети от включения устройств с потерями в их основном оборудовании. На основании выполненной работы определены элементы, имеющие наибольшие потери. Описаны особенности каждого устройства, влияющие на потери мощности в основном оборудовании. Сделаны выводы об эффективности рассматриваемых схем. Предложены методы снижения потерь мощности в основном оборудовании и расхода на энергопотребление.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, потери мощности, тиристорно-реакторная группа, устройства компенсации реактивной мощности, фильтрокомпенсирующая цепь, пост секционирования, энергопотребление.

Vasily T. Cheremisin, Andrey V. Nikonov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

ANALYSIS OF POWER LOSSES IN THE MAIN EQUIPMENT STATIC VAR COMPENSATORS TAKING INTO ACCOUNT THE NON-SINUSOIDAL VOLTAGES AND WAYS OF ITS REDUCTION

Abstract. With the purpose of providing capacity on the West-Siberian railway, in recent times, adjustable reactive power compensation devices have been introduced. The schematic construction and parameters of such devices on the market are significantly different. In connection with this, it is necessary to choose from the set of schemes the most effective, corresponding to specific technical and economic conditions. The article assesses the power losses in the main equipment of two devices from different manufacturers, namely static thyristor compensators of reactive power produced by "KER Holding" Kazan and "Aidis groups" Moscow, installed on the Alambay and Novaya Dubrava sectional posts of the West Siberian Iron roads. The power losses in the equipment are calculated taking into account additional losses from the influence of higher harmonic components. The analysis of the circuit design of both devices in terms of loss reduction is carried out. Dependences of power losses in their elements on the generated reactive power and the current of the thyristor-reactor group are constructed. Probabilistic functions of the distribution of the current of the thyristor-reactor groups of devices are given at preset settings. The results of measurements of power consumption of devices for own needs are presented. The effect of reducing power losses in the traction network from switching devices with losses in their main equipment is compared. On the basis of the work done, the elements with the greatest losses are identified. The features of each device, affecting the power loss in the main equipment, are described. Conclusions are drawn about the effectiveness of the schemes under consideration. Methods for reducing power losses in basic equipment and consumption for energy consumption are proposed.

Keywords: static thyristor compensator, power loss, thyristor-reactor group, reactive power compensation devices, filter-compensating circuit, post-sectioning, power consumption.

Одной из основных задач «Стратегии развития железнодорожного транспорта России на период до 2030 г.» является внедрение энергосберегающих технологий, направленных на снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на единицу эксплуатационной работы [1]. С учетом ограничения инвестиционных средств, направленных на развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта, в частности, системы тягового электропитания, наиболее эффективным и капиталоемким мероприятием для решения данной задачи является внедрение регулируемых устройств емкостной компенсации реактивной мощности (далее – устройств). Кроме того, данные устройства являются наиболее эффективным средством усиления системы тягового электропитания, что в связи с увеличением грузооборота актуально для ряда участков, электрифицированных на переменном токе.

Основным назначением устройств является компенсация реактивной мощности, а следовательно, снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и повышение уровня напряжения в точке присоединения, что позволяет в определенных пределах увеличить пропускную способность участков.

На Западно-Сибирской железной дороге за последние несколько лет на постах секционирования (ПС) введено в работу пять регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности, из них три отличаются значительными конструктивными особенностями [2, 3].

В статье представлен анализ двух схем статических тиристорных компенсаторов (СТК) разных производителей, а именно «Айдис групп», г. Москва и «КЭР-Холдинг», г. Казань, установленных на ПС Алаumbai и Новая Дубрава в границах межподстанционных зон Световская – Плотинная и Тягун – Артышта II соответственно. В качестве основных показателей рассматриваются потери мощности в элементах силовой части устройств и их энергопотребление на собственные нужды.

Схемы устройств практически идентичны (рисунок 1), однако параметры основного оборудования значительно отличаются (таблица 1). Номинальная мощность обоих устройств составляет 6,7 Мвар. Номинальное напряжение – 27,5 кВ.

Таблица 1 – Основные параметры оборудования СТК «КЭР-Холдинг» и «Айдис групп»

| Производитель СТК | Параметры реакторов | | | | Параметры КБ | | | | | Тип тиристоров |
|-------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|-------------|-----|-----|----------------|----------------|
| | $L_{ТРГ}$, мГн | $r_{ТРГ}$, Ом | $L_{ФКЦ}$, мГн | $r_{ФКЦ}$, Ом | C , мкФ | C_n , мкФ | m | n | $tg\delta$, % | |
| КЭР Холдинг | 143,7 | 0,18 | 54,5 | 0,07 | 22,7 | 15,1 | 4 | 6 | 0,06 | T243-400-40 |
| Айдис групп | 340,0 | 0,44 | 48,5 | 0,08 | 24,9 | 9,95 | 4 | 10 | 0,06 | T-500-36 |

Схемы устройств включают в себя тиристорно-реакторную группу (ТРГ) – плавнорегулируемый источник реактивной мощности индуктивного характера и фильтрокомпенсирующую цепь (ФКЦ) – источник реактивной мощности емкостного характера и фильтр высших гармоник, настроенный на частоту третьей гармоники. ФКЦ состоит из реактора и конденсаторной батареи (КБ). ТРГ представляет собой последовательно соединенные высоковольтный тиристорный вентиль (ВТВ) и реактор.

Алгоритм работы устройств заключается в сравнении напряжения в точке подключения с напряжением уставки. Когда уровень напряжения ниже выбранной уставки – ФКЦ генерирует реактивную мощность емкостного характера. Для ее регулирования в моменты снижения нагрузки в работу подключается ТРГ, генерирующая ток индуктивного характера, который взаимокompенсирует ток ФКЦ. Ток ТРГ регулируется с помощью ВТВ путем изменения угла зажигания α . Таким образом, реактивная мощность СТК плавно регулируется от нуля до номинального значения [4 – 7].

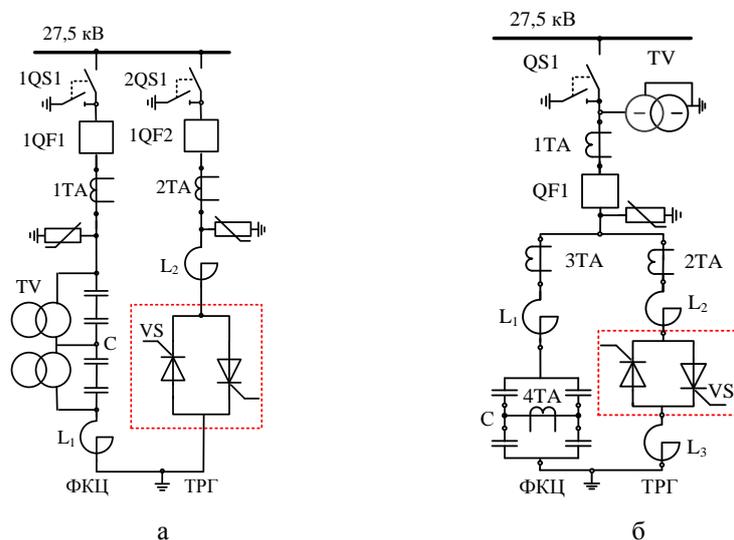


Рисунок 1 – Схемы: а – СТК «КЭР-Холдинг»; б – СТК «Айдис групп»

Общие потери в СТК складываются из потерь мощности в ФКЦ и в ТРГ. В целом расчет сводится к определению потерь в КБ, реакторах и ВТВ.

Потери мощности в КБ определяются по формуле, Вт [8, 9]:

$$\Delta P_C = U_{НОМ}^2 \cdot \omega \cdot C_{НОМ} \cdot tg\delta, \quad (1)$$

где $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, %;

$U_{\text{ном}}$ – напряжение на конденсаторной батарее, В;

$C_{\text{ном}}$ – емкость конденсаторной батареи, мФ;

ω – угловая частота основной гармоники.

Величина потерь в реакторе зависит от величины протекающего тока и может быть определена по выражениям:

$$\Delta P_L = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2}; \quad (2)$$

$$\Delta P_L = I^2 \cdot r, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{ном}}$ – потери в реакторе при номинальном токе, Вт;

r – активное сопротивление реактора, Ом;

I – ток, протекающий через реактор, А;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток реактора, А.

В соответствии с рекомендациями источников [10 – 12] в тиристорах различают пять видов потерь. Расчет общих потерь выполняется по формуле, Вт:

$$\Delta P_{\text{ВТБ}} = N \cdot (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5), \quad (4)$$

где ΔP_1 – потери от прямого тока в открытом состоянии, Вт;

ΔP_2 – потери от прямого тока в закрытом состоянии, Вт;

ΔP_3 – потери от обратного тока, Вт;

ΔP_4 – коммутационные потери, Вт;

ΔP_5 – потери в цепи управления, Вт;

N – число тиристоров в открытом состоянии.

В соответствии с утверждением в работе [10] при работе тиристоров на частоте менее 400 Гц определяющими являются потери от протекания через них тока в открытом состоянии. Величина остальных потерь незначительна и ими, как правило, пренебрегают, таким образом, расчет потерь мощности в тиристоре сводится к определению тока в прямом направлении, Вт:

$$\Delta P_1 = U_{\text{ю}} \cdot I_{\text{ТРГср}} + r_i \cdot I_{\text{ТРГ}}^2 = \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{\text{ТРГ}} \cdot U_{\text{ю}} + I_{\text{ТРГ}}^2 \cdot \frac{r_i}{2} \right), \quad (5)$$

где $U_{\text{ю}}$ – пороговое напряжение тиристора, В;

r_i – динамическое сопротивление тиристора, Ом;

$I_{\text{ТРГср}}$ – средний ток через тиристор, А;

$I_{\text{ТРГ}}$ – действующий ток через тиристор, А.

Следует отметить, что искажение приложенного напряжения, обусловленное высшими гармониками в токе тяговой нагрузки, приводит к дополнительным потерям в реакторе и диэлектрике конденсаторов.

Для конденсаторов дополнительные потери на частоте n -й гармоники рассчитываются по выражению, Вт [13, 14]:

$$\Delta P_{\Sigma C(n)} = \omega \cdot \sum_2^n U_{(n)}^2 \cdot n \cdot C \cdot \text{tg } \delta_n, \quad (6)$$

где ω – номинальная угловая частота, рад/с;

C – емкость конденсаторной батареи, мкФ;

$\text{tg } \delta_n$ – коэффициент диэлектрических потерь на n -й гармонике;

$U_{(n)}$ – напряжение n -й гармоники, В.

Напряжения n -х гармоник взяты на основании усреднения суточных коэффициентов n -х гармонических составляющих шин 27,5 кВ соответствующего ПС на основе результатов измерения.

Значение $\operatorname{tg} \delta$ согласно рекомендациям источника [13] на частотах до 1000 Гц принимается равным номинальному значению используемого типа диэлектрика. На частотах до 3000 Гц емкость КБ неизменна и принимается равной номинальному значению.

В расчетах принято [15], что напряжение на конденсаторах на 12,5 % выше, чем на шине ПС.

При расчете потерь мощности в реакторах с возрастанием частоты (гармоники) увеличивается сопротивление провода за счет поверхностного эффекта и эффекта близости. Потери в реакторах с учетом влияния высших гармонических составляющих определяются по формуле, Вт:

$$\Delta P_{\Sigma L(n)} = \omega \cdot \sum_1^n I_{(n)}^2 \cdot r \cdot k_{r(n)}, \quad (7)$$

где $I_{(n)}$ – действующее значение тока n -й гармоники через реактор, А;

r – активное сопротивление на основной частоте, Ом;

$k_{r(n)}$ – коэффициент, учитывающий возрастание сопротивления обмотки вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости (обычно в расчетах данным коэффициентом пренебрегают).

С целью определения показателей электроэнергии, необходимых для расчета потерь мощности, проведены их измерения с помощью анализатора качества электроэнергии «ИВК-Омск». На момент измерений уставка СТК «КЭР-Холдинг» по уровню напряжения составляла 26,5 кВ, а наклон внешней характеристики (статизм) – 0 %, уставка СТК «Айдис групп» – 27,5 кВ, статизм – 3 %. Указанные параметры оказывают влияние на вероятность распределения тока в тиристорно-реакторной группе, а следовательно, и на вероятность распределения потерь электроэнергии в оборудовании ТРГ. В связи с этим с целью достоверного сравнения двух рассматриваемых схем СТК построены зависимости общих потерь мощности в их оборудовании от генерируемой мощности с учетом влияния высших гармонических составляющих (рисунок 2), потерь в каждом из элементов от действующего тока ТРГ (рисунок 3) и общих потерь мощности от действующего тока ТРГ, совмещенных с вероятностной функцией его распределения (рисунок 5). В таблице 2 представлены необходимые для расчета параметры тириستоров.

Таблица 2 – Параметры элементов оборудования СТК «КЭР-Холдинг» и «Айдис групп»

| Тип тиристора | $U_{ю}$, В | r_T , Ом | N , шт. |
|---------------|-------------|------------|-----------|
| T243-400-40 | 1,15 | 1,27 | 28 |
| T-500-36 | 1,12 | 1,27 | 14 |

По результатам расчета потери мощности в оборудовании СТК «КЭР-Холдинг» составляют: минимальные – 8,7 кВт, средние – 15 кВт, максимальные – 30 кВт; в оборудовании СТК «Айдис групп» соответственно – 12,3; 21 и 43,2 кВт.

Из рисунка 2 видно, что потери мощности в основном оборудовании СТК минимальны в моменты, когда ток ТРГ равен нулю. Следовательно, снизить потери можно за счет уменьшения времени работы именно ТРГ путем оптимизации уставки СТК и подбора мощности на стадии проектирования.

Максимальные потери в оборудовании СТК возникают, когда ток ТРГ равен либо больше тока ФКЦ, что соответствует интервалам при отсутствии нагрузки на зоне. С целью снижения уровня напряжения часто (рисунок 2, б) мощность реактора ТГР закладывают больше реактора ФКЦ, что экономически нецелесообразно. Более эффективно разбить ФКЦ на несколько контуров и при необходимости выводить один из них из работы, что позволит

генерировать реактивную мощность индуктивного характера. Зависимость потерь в элементах СТК от протекаемого тока представлена на рисунке 3.

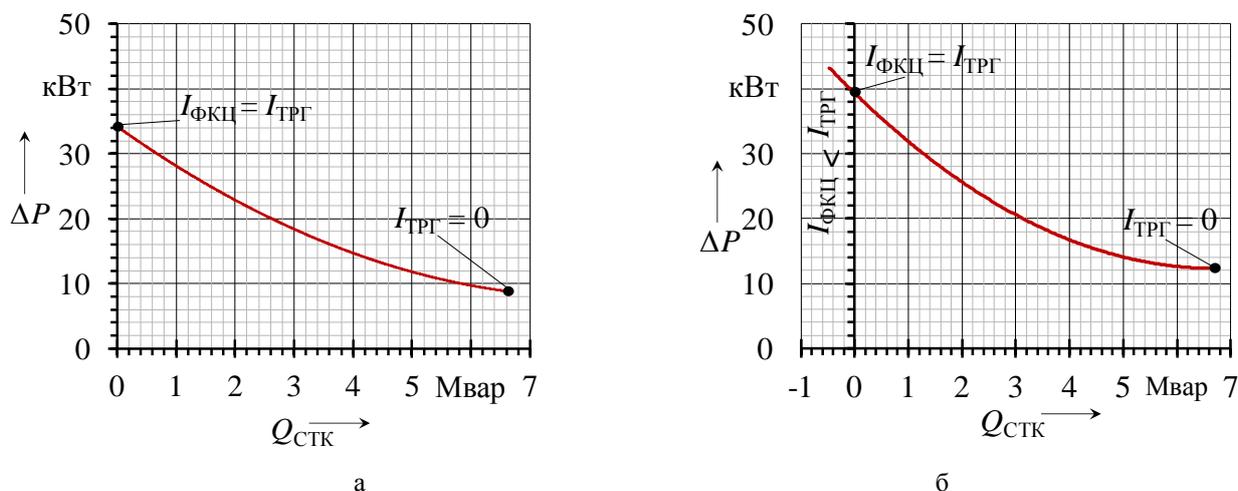


Рисунок 2 – Зависимость потерь мощности в оборудовании СТК от генерируемой реактивной мощности: а – СТК «КЭР-Холдинг», б – СТК «Айдис групп»

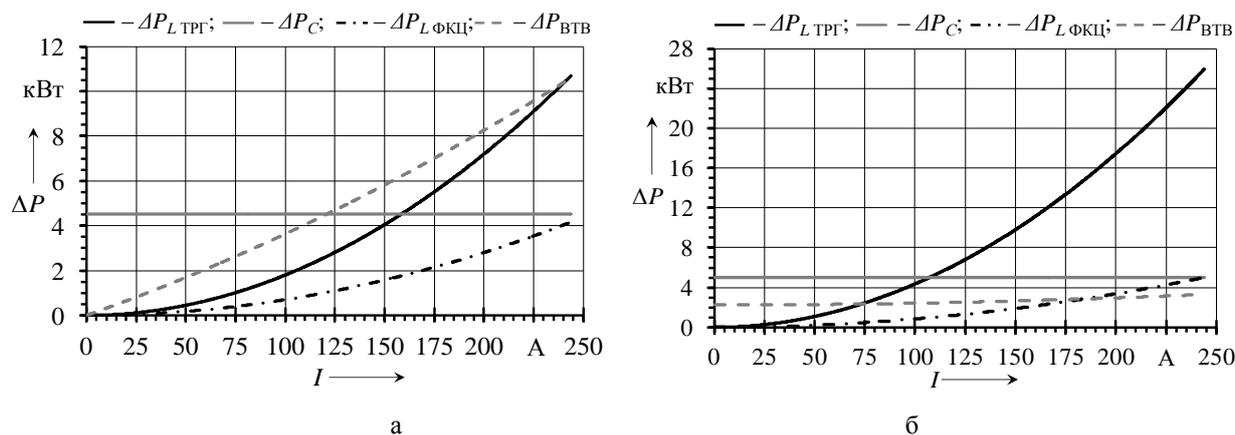


Рисунок 3 – Зависимость потерь в оборудовании от действующего тока: а – СТК «КЭР-Холдинг», б – СТК «Айдис групп»

Как видно из рисунка 3, наибольшая разница потерь мощности – в оборудовании обоих устройств в реакторах ТРГ и в ВТВ, что объясняется разной номинальной мощностью используемых реакторов и числом тиристоров. Мощность реактора зависит от диапазона угла зажигания тиристоров. Так, для СТК «КЭР-Холдинг» диапазон угла зажигания – $120 - 169^\circ$, для СТК «Айдис групп» – $90 - 180^\circ$.

Зависимость действующего значения основной гармоники тока ТРГ от угла зажигания α (рисунок 4) определяется выражением [7]:

$$I_1^{\text{ТРГ}} = \frac{1}{\pi} \cdot [2 \cdot (\pi - \alpha) - \sin 2(\pi - \alpha)]. \quad (8)$$

Таким образом, рациональный подход к выбору диапазона регулирования угла зажигания позволяет снизить номинальную мощность реактора, а следовательно, и потери в нем.

Ниже представлены зависимости потерь мощности в основном оборудовании от действующего тока в цепи ТРГ, совмещенные с вероятностной функцией его распределения (рисунок 5).

Как видно из рисунка 5 (гистограммы), большую часть времени, а именно 39,4 %, ток ТРГ СТК «КЭР-Холдинг» находится в диапазоне 0 – 25 А. У СТК «Айдис групп» ток ТРГ

распределен более равномерно. Разница в распределении тока в большей степени определена заданными уставками и особенностями участков, на которых эксплуатируются устройства.

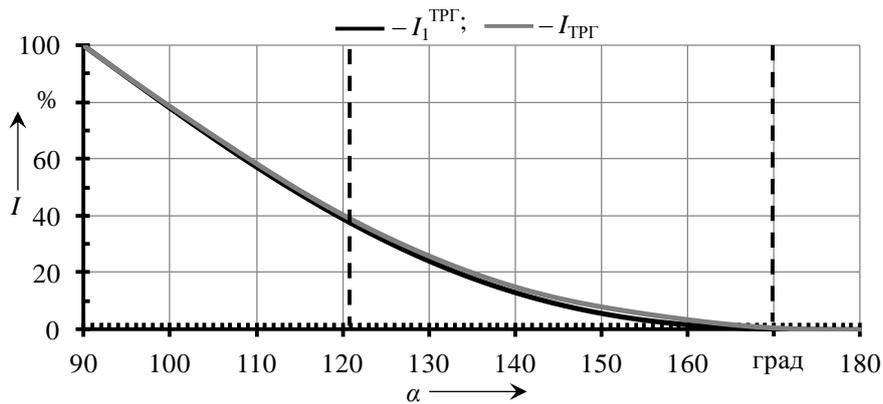


Рисунок 4 – Зависимости действующего тока основной гармоники и действующего значения полного тока с учетом гармоник в цепи ТРГ от угла зажигания α

Результаты измерений энергопотребления на собственные нужды показали, что автоматика системы отопления модулей и обдува силовой части обоих устройств нуждается в наладке. Так, СТК «КЭР-Холдинг» в среднем потребляет 5,6 кВт·ч, СТК «Айдис групп» – 7,2 кВт·ч.

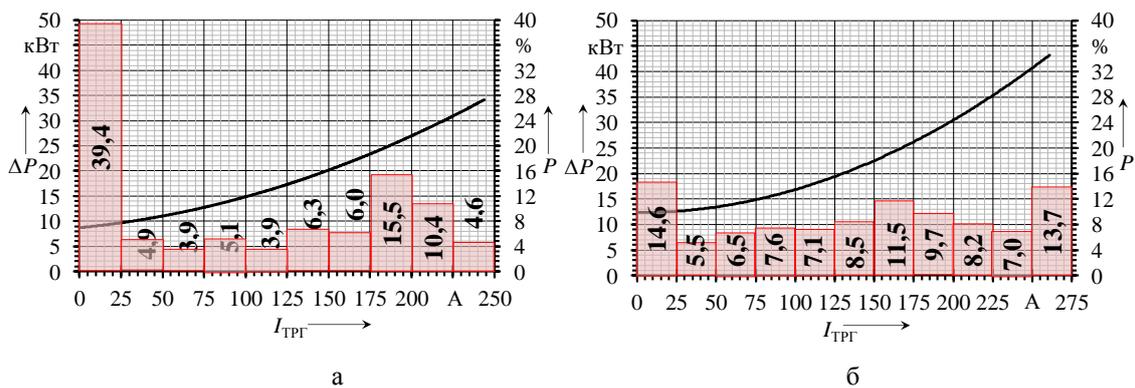


Рисунок 5 – Зависимость общих потерь в оборудовании от действующего тока ТРГ и его вероятностное распределение: а – СТК «КЭР-Холдинг»; б – СТК «Айдис групп»

Расчеты показывают, что для системы тягового электроснабжения переменного тока переход от нерегулируемых к регулируемым устройствам компенсации для средних условий позволяет дополнительно экономить не более 6 – 8 % от активных потерь электроэнергии в тяговой сети без учета компенсирующих устройств [16].

Для сопоставления величины потерь мощности в оборудовании СТК вместе с нагрузкой собственных нужд и снижением потерь в тяговой сети при его включении в программном комплексе «КОРТЭС» были оценены потери в тяговой сети на участках Тягун – Артышта II и Световская – Плотинная. Средняя масса и количество поездов были выбраны из Паспорта наличной пропускной способности участков Западно-Сибирской железной дороги за 2015 г. На участке Тягун – Артышта II в нечетном направлении масса поездов – 6007 т, количество поездов в сутки – 56 шт., в четном – 2496 т, количество – 50 шт. На участке Световская – Плотинная масса поездов в нечетном направлении составляет 6535 т, в четном – 2566 т, количество поездов в обоих направлениях – 48 шт. [17, 18].

При расчете приняты следующие допущения: СТК рассматриваются как нерегулируемые, т. е. их мощность не изменяется во времени и составляет 6,7 Мвар; нагрузка на зоне распределена равномерно.

По результатам расчета потери мощности в тяговой сети для участка Тягун – Артышта II составляют ≈ 382 кВт. Включение СТК «КЭР-Холдинг» позволяет уменьшить потери на зоне на

≈59,6 кВт, при суммарных потерях в элементах вместе с нагрузкой собственных нужд (СН), равных в среднем 21,6 кВт, снижение потерь составляет ≈ 38,5 кВт. Потери мощности в тяговой сети для участка Световская – Плотинная составляют ≈ 358,8 кВт. Включение СТК «Айдис групп» позволяет уменьшить потери на зоне на ≈ 62,3 кВт, при суммарных потерях в элементах вместе с нагрузкой СН, равных в среднем 28,2 кВт, снижение потерь составляет ≈ 34,1 кВт. По результатам анализа можно сделать выводы о большей эффективности схемы СТК «КЭР-Холдинг». Разница потерь обусловлена разнотипностью параметров основного оборудования. В части снижения потерь в тяговой сети с учетом потерь в собственном оборудовании и расходом электроэнергии на собственные нужды эффект при вводе в работу устройств сопоставим. В целом использование СТК с целью снижения потерь в тяговой сети является целесообразным.

Таким образом, можно сделать выводы об эффективности применения СТК с целью снижения потерь в тяговой сети. По результатам выполненной оценки более эффективна схема СТК «КЭР-Холдинг». Разница в потерях мощности двух рассматриваемых схем объясняется выбором реакторов ТРГ и количеством тиристоров. Номинальный ток реакторов зависит от диапазона регулирования угла зажигания тиристоров. Более рациональный подход в данном случае позволил сократить капитальные и эксплуатационные расходы. С точки зрения энергопотребления, в частности, системы отопления и обдува, необходима оптимизация уставок срабатывания обоих устройств.

Минимизировать потери на стадии эксплуатации можно за счет выбора уставки и статизма, сократив время работы ТРГ, и наладки автоматики работы систем отопления и обдува.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г. [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 96 с.
2. Никонов, А. В. Эффективность регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности электрифицированных железных дорог [Текст] / А. В. Никонов // Материалы второй всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 241 – 248.
3. Черемисин, В. Т. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования [Текст] / В. Т. Черемисин, А. В. Никонов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2018. – №1. – С. 98 – 104.
4. Никонов, А. В. Оценка энергоэффективности статического тиристорного компенсатора [Текст] / А. В. Никонов // Материалы науч. конф. «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 98 – 104.
5. Padiyar K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution, Bagalore, 2007, 549 p.
6. Hingorani N. G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems, New York, 2000, 444 p.
7. Матура, Р. М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности [Текст] / Р. М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
9. Гидалевич, Е. Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при несинусоидальном напряжении [Текст] / Е. Д. Гидалевич // Промышленная энергетика / ЗАО «Научно-техническая фирма «Энергопрогресс». – М., 1990. – № 7. – С. 24 – 30.
10. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники: Учебник [Текст] / Г. С. Зиновьев / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2011. – Ч. 1. – 201 с.
11. Лакутин, Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие [Текст] / Б. В. Лакутин, С. Г. Обухов / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2013. – 153 с.

12. Полупроводниковые выпрямители [Текст] / Е. И Беркевич, В. Н Ковалев и др. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
13. Кочкин, В. И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий [Текст] / В. И. Кочкин, О. П. Нечаев. – М.: Энас, 2002. – 248 с.
14. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 186 с.
15. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник [Текст] / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.
16. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: Учебное пособие [Текст] / Л. А. Герман, А. С. Серебряков / УМЦ ЖДТ. – М., 2015. – 316 с.
17. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 10 ноября 2010 г. № 128 р / ОАО «РЖД». – М., 2010. – 305 с.
18. Приказ ОАО «РЖД» № ЦТ-24 от 25.02.2016 «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» / ОАО «РЖД». – М., 2017. – 57 с.

References

1. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda* (Energy strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030), Moscow, 2011. 96 p.
2. Nikonov, A. V. The Effectiveness of the devices of the transverse compensation of the reactive power of the electrified Railways [Effektivnost' reguliruemymh ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti elektrificirovannyh zheleznyh dorog]. : *Materialy vtoroj vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte» Omskij gos. un-t putej soobshcheniya* (Instruments and methods of measurement, control and diagnostics in the industry and on the transport Of the second all-Russian scientific and technical conference with the international participation of the Omsk state. UN-t ways of communication). Omsk, 2016, pp. 241 – 248.
3. Cheremisin, V. T., Nikonov A. V. Comparing the energy performance of regulated devices cross reactive power compensation, the conditions on the positions of the partition [Sravnenie energeticheskikh pokazatelej reguliruemymh ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti v usloviyah ekspluatacii na postah sekcionirovaniya]. *Transport Urala – The journal of Transport of Ural*, 2018. no. 1, pp. 98 – 104.
4. Nikonov, A. V. Evaluation of the efficiency of static thyristor compensator [Ocenka energoeffektivnosti staticheskogo tiristornogo kompensatora]. *Materialy nauchnoj konferencii Omskij gos. un-t putej soobshcheniya «Povyshenie energeticheskoeffektivnostinazemnyh transportnyh system»* (Materials of the scientific conference of the Omsk state University of Railways «Improving the energy efficiency of the transport systems»). – Omsk, 2016, pp. 98 – 104.
5. Padiyar K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution, Bagalore, 2007, 549 p.
6. Hingorani N. G. Understanding FACTS: consepts and technology of flexible AC transmission systems, New York, 2000, 444 p.
7. Matura R. M. *Staticheskie kompensatory dlya regulirovaniya reaktivnoj moshchnosti* (Static compensators for reactive power control). Moscow: Energoatomizdat 1987, 160 p.
8. Marquardt, C. G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* (Electricity electrified Railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
9. Gidalevich, E. D. Simplified calculation of power losses in cosine capacitors at non-sinusoidal voltage [Uproshchennyj raschet moshchnosti poter' v kosinusnyh kondensatorah pri nesinusoidal'nom napryazhenii]. *Promyshlennaya Energetika – The journal of Industrial power engineering*, 1990, no. 7. pp. 24 – 30.
10. Zinoviev G. S. *Osnovy silovoj elektroniki. Chast' 1* (Fundamentals of power electronics. Part 1) Novosibirsk. Publishing house of Novosibirsk state technical University. 2011, 201 p.

11. Lakutin, B. V., Obukhov S. G. *Silovye preobrazovateli v elektrosnabzhenii* (Power converters in electric power supply), Tomsk: Publishing house Of the Polytechnic University. 2013, 153 p.
12. Berkovich, E. I., Kovalev V. N., Kovalev, F. I. *Poluprovodnikovye vypriamiteli* (Semiconductor rectifiers). Moscow: Energy, 1978, 448 p.
13. Kochkin, V. I., Nechaev O. P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoj moshchnosti v elektricheskikh setyah energosistem i predpriyatij* (Application of static reactive power compensators in electric networks of power systems and enterprises). Moscow: publishing house of the NTS ENAS, 2002, 248 p.
14. Zhezhelenko, I. V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya predpriyatij* (Higher harmonics in power supply systems of enterprises). Moscow: Energoatomizdat, 2000, 186 p.
15. Mamoshin, R. R., Zimakova A. N. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannykh zheleznnykh dorog* (Electricity supply of electrified Railways). Moscow: Transport, 1980, 296 p.
16. Herman L. A, Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: ucheb. Posobie* (Adjustable capacitive compensation units In traction power supply systems of Railways: studies. Manual) A. S. Moscow: FEDERAL state budget institution «Training center on education on railway transport», 2015, 316 p.
17. *Instrukciya po raschetu nalichnoj propusknoj sposobnosti zheleznnykh dorog. Utverzhdena 10.11.2010 g* (Instructions for calculating the available capacity of Railways. Approved 10.11.2010), Moscow: 2011, 305 p.
18. *Prikaz OAO «RZhD» № СТ-24 от 25.02.2016 «Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskih i gruzovykh poezdov na uchastkah, obsluzhivaemykh Zapadno-Sibirskoj direkciej tyagi»* (Order of JSC "Russian Railways" № СТ-24 from 25.02.2016"on the establishment of standards of mass and length of passenger and freight trains in areas served by the West Siberian Directorate of traction."), Moscow: 2016, 57 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Никонов Андрей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7-929-364-42-44.

E-mail: AndrewNikonov671@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Черемисин, В. Т. Анализ потерь мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов с учетом несинусоидальности напряжения и пути их снижения [Текст] / В. Т. Черемисин, А. В. Никонов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 54 – 63.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Cheremisin Vasilij Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor, Head of department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Nikonov Andrey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate, Chair «Rolling Stock of Electric Railways», OSTU.

Phone: +7-929-364-42-44.

E-mail: AndrewNikonov671@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheremisin, V. T., Nikonov A. V. Analysis of power losses in the main equipment static var compensators taking into account the non-sinusoidal voltages and ways of its reduction. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no 37, pp. 54 – 63 (In Russian).

УДК 621.311.4: 621.331

А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко

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

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДВЕСНЫХ ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

***Аннотация.** Предложена методика дистанционного диагностирования подвесных фарфоровых изоляторов на основе импульсного метода. Определена форма испытательных импульсов для диагностирования изоляторов на участке контактной сети постоянного тока. Приведены и рассчитаны основные диагностические параметры подаваемых и регистрируемых импульсов. Выявлена возможность определения расстояния до неисправной гирлянды в зависимости от амплитудного значения диагностического импульса. Рассмотрено изменение пикового значения спада импульса в зависимости от сопротивления гирлянды изоляторов. Предложенная методика позволяет локализовать положение неисправной гирлянды изоляторов на участке электропитания постоянного тока и в последующем достоверно определять неисправный изолятор в гирлянде.*

***Ключевые слова:** контактная сеть, методика дистанционного диагностирования, фарфоровый изолятор, диагностический импульс.*

Andrey A. Kuznetsov, Anton Yu. Kuzmenko

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

METHOD OF REMOTE DIAGNOSTICS SUSPENDED PORCELAIN INSULATOR DC CATENARY

***Abstract.** A method for remote diagnosis of suspended porcelain insulators based on the pulse method is proposed. The form of test pulses for diagnosing isolators in the area of the DC contact network is determined. The main diagnostic parameters of the supplied and recorded pulses are given and calculated. The possibility of determining the distance to the faulty garland depending on the amplitude value of the diagnostic pulse has been revealed. The change of the peak value of the pulse decay depending on the resistance of the insulator string is considered. The proposed method allows localizing the position of a faulty insulator string at the DC power supply section, and subsequently reliably determining the faulty insulator in the festoon.*

***Keywords:** contact network, remote diagnostics technique, porcelain insulator, diagnostic pulse.*

Надежность системы электроснабжения железнодорожного транспорта во многом зависит от безотказной работы контактной сети, одними из критических элементов которой являются подвесные изоляторы.

При достаточной диэлектрической составляющей выход из строя одного из изоляторов в гирлянде может не привести к нарушению нормальной работы участка контактной сети (КС), но накопление со временем дефектных изоляторов ведет к пробоям и повышению вероятности возникновения аварийных ситуаций [1]. Поэтому применение электрических методов диагностирования является актуальной задачей.

Среди методов диагностирования состояния изоляторов преобладают электрические, оптические и ультразвуковые [2]. Использование данных методов является наиболее эффективным для участков КС переменного тока, так как наличие дефектов определяется, например, на основе регистрации частичных разрядов или выявления повышенной температуры изолирующих элементов [3, 4]. На участках КС постоянного тока дефекты изоляции являются скрытыми и плохо выявляются указанными методами.

Снижение изолирующих свойств гирлянд связано с уменьшением номинального сопротивления изоляторов вследствие их внутреннего пробоя. На начальном этапе с достаточной степенью точности можно выявить гирлянды с пониженными изолирующими свойствами, что составляет цель исследования данной статьи. Далее возможно определение неисправного

изолятора в самой гирлянде, например, методом регистрации параметров электрического поля вокруг гирлянды [5, 6].

В настоящей статье особое внимание уделяется диагностированию подвесных фарфоровых изоляторов, остающихся в эксплуатации в большом количестве на полигоне систем электроснабжения постоянного тока. Применение данной методики на участках железных дорог переменного тока возможно, но с учетом увеличения мощности силовой части измерительного комплекса [7].

Основными факторами, влияющими на диэлектрические свойства изоляторов, являются быстрое старение в условиях длительной эксплуатации (особенно при отрицательной температуре), выходы из строя фиксирующих узлов, недостаточная механическая прочность при динамических нагрузках и нарушение норм эксплуатации.

В моменты прохождения подвижного состава под фиксаторами контактной подвески возникают вертикальные динамические нагрузки, со временем приводящие к разрушению изоляторов [8]. В таких случаях в теле изолятора образуются скрытые трещины, которые со временем наполняются влагой, пылью и другими инородными веществами. Таким образом, возникает токопроводящий слой, значительно снижающий диэлектрические свойства изолятора, вплоть до их полной потери. Имеют место и скрытые дефекты изоляторов, которые невозможно обнаружить визуально либо при помощи электрических испытаний. Такие дефекты представляют наибольшую опасность.

Фарфоровые тарельчатые изоляторы на участках постоянного тока диагностируют при помощи измерительной штанги типа ШИ-10 с изолирующей рабочей площадкой съемной вышки или автотрисы [3]. Перед измерением необходимо проверить исправность измерительной штанги, для чего нужно щупами штанги коснуться одновременно токоведущих и заземленных частей. У исправной измерительной штанги стрелка прибора должна перейти за предельную красную отметку и одновременно загорится неоновая лампочка-индикатор. Для диагностирования гирлянды с тремя изоляторами штанга оборудуется приставкой с двумя щупами. Измерение осуществляется касанием щупами штанги одновременно по обе стороны изолятора гирлянды поочередно: первым – со стороны контактной сети (напряжения), вторым – со стороны заземляющих конструкций, а затем – средних изоляторов. Изоляторы, имеющие сопротивление 300 МОм и менее и ток утечки 10 мкА и более, считаются дефектными. В этих случаях стрелка измерительного прибора будет уходить вправо за красную предельную отметку и будет загораться неоновая лампочка-индикатор.

Данный метод диагностирования подразумевает проверку каждой гирлянды в отдельности и является весьма трудозатратным.

При дистанционном определении местоположения неисправной гирлянды высокочастотный сигнал с большим амплитудным значением можно заменить последовательностью импульсов прямоугольной формы меньшей частоты, что снизит затраты на реализацию аппаратной части испытательного комплекса [7].

На рисунке 1 представлена схема проведения экспериментальных исследований на участке контактной сети учебного полигона ОмГУПС. Неисправный изолятор (НИ) соединялся с контактной сетью и рельсовым заземлением в положениях 1, 2, 3, как показано на рисунке 1. Подключение прибора контроля изоляции (ПКИ) к контактной сети осуществлялось при помощи измерительной штанги (ИШ). Для эксперимента были выбраны подвесные фарфоровые изоляторы тарельчатого типа ПФ-70.

Так как изолятор представляет собой комплексное сопротивление, каждая из гармонических составляющих входного сигнала влияет на форму диагностического импульса по-разному. На рисунке 2 приведена последовательность диагностических импульсов рабочего участка, когда неисправная гирлянда изоляторов в линии отсутствует.

На рисунке 3 приведены совмещенные последовательности диагностирующих сигналов при нахождении поврежденной гирлянды в различных положениях на протяжении всего участка

контактной сети. По спаду заднего фронта диагностического импульса видно, что на участке, содержащем неисправную гирлянду, происходит разряд емкостной составляющей изоляторов на входные цепи измерительного комплекса.

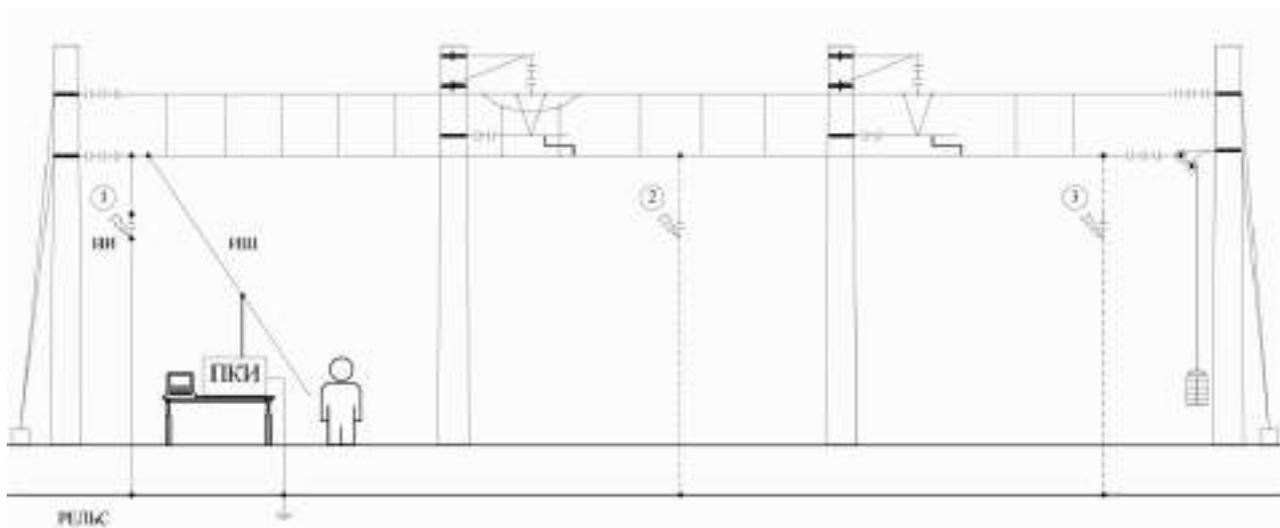


Рисунок 1 – Схема измерения для участка КС

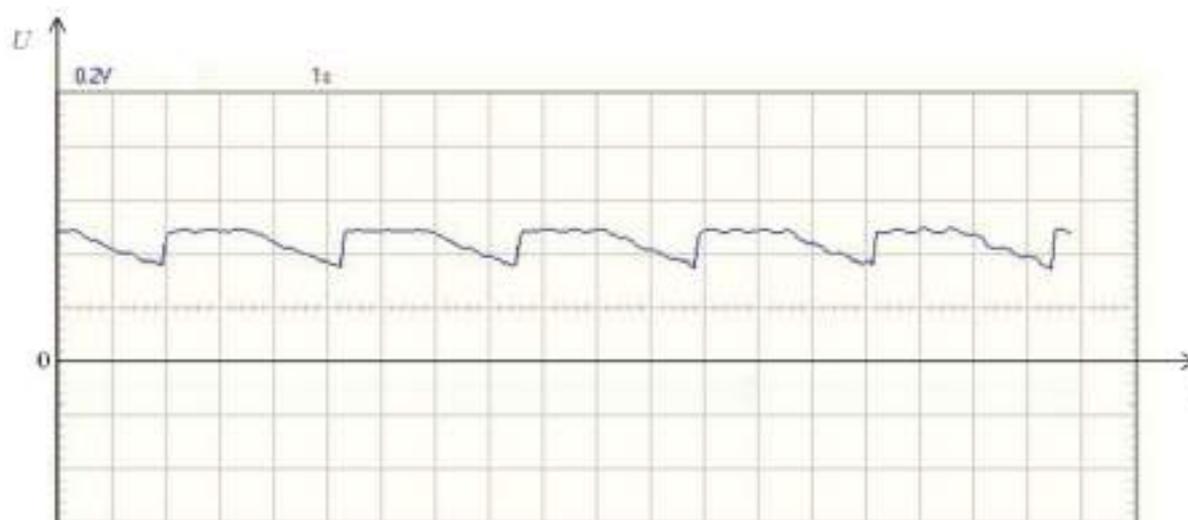


Рисунок 2 – Последовательность диагностических импульсов исправного участка

Для определения диагностических параметров данные каждой последовательности были обработаны в программном комплексе MathCad [9].

Для обработки было выбрано по одному характерному импульсу с каждого графика. Результаты построения импульсных зависимостей в программном комплексе MathCad представлены на рисунке 4.

Для проведения сравнительного анализа количественных составляющих полученных импульсов рассчитывались следующие параметры:

амплитудное значение

$$U_m = \max_{t \in (t_1, t_2)} |u(t)|, \quad (1)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения;

среднеквадратическое (действующее) значение

$$U = \sqrt{\frac{I}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt}; \quad (2)$$

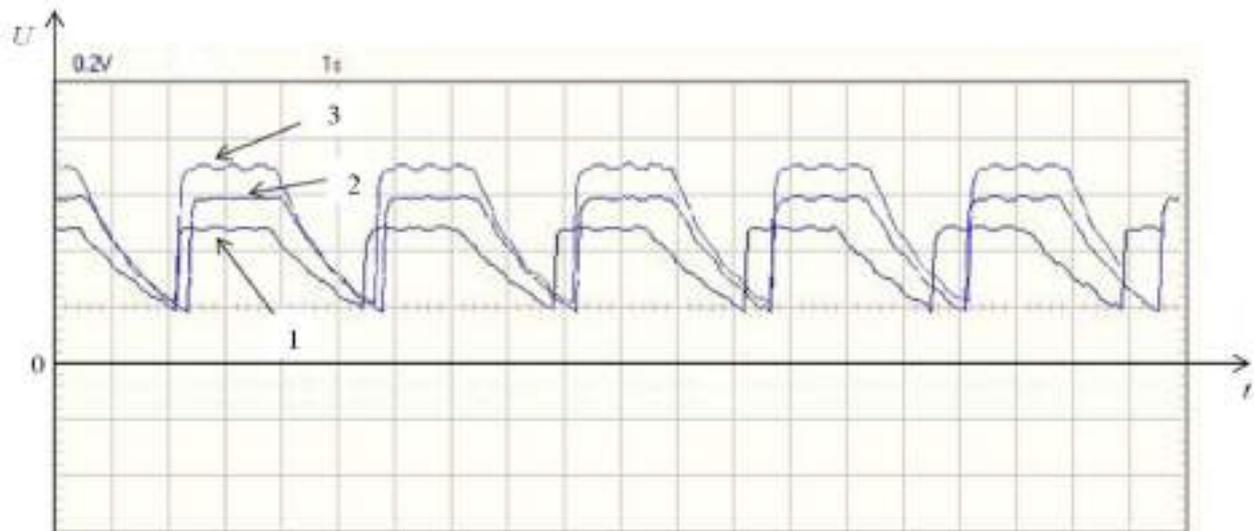


Рисунок 3 – Последовательности диагностических импульсов в различных режимах работы

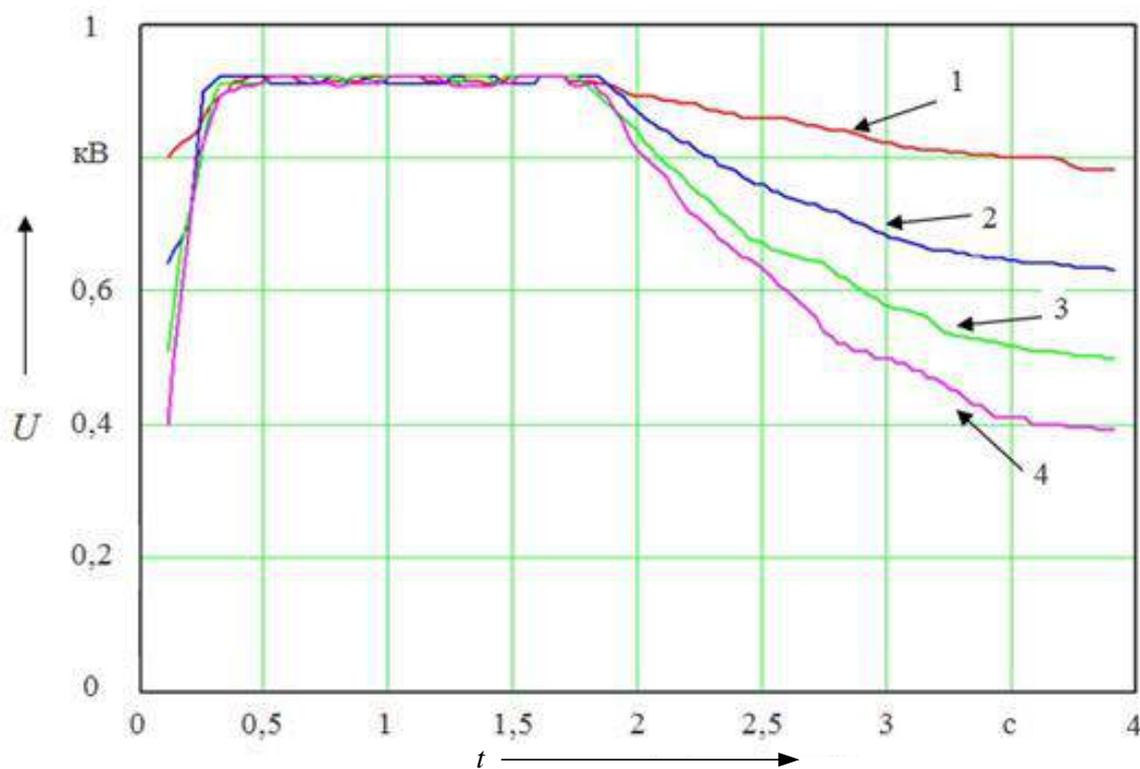


Рисунок 4 – Диагностические импульсы в различных режимах работы: 0 – импульс на участке КС с исправными гирляндами; 1, 2, 3 – поврежденная гирлянда находится в различных положениях на протяжении участка КС

постоянная составляющая

$$U_0 = \frac{I}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt, \quad (3)$$

где t_1, t_2 – моменты времени интегрирования мгновенных значений напряжения;

а также интегральные коэффициенты формы, амплитуды и усреднения:

$$k_{\phi} = \frac{U}{U_0}; \quad (4)$$

$$k_a = \frac{U_m}{U}; \quad (5)$$

$$k_y = \frac{U_m}{U_0}. \quad (6)$$

Было определено, что при испытаниях на участке с неисправной гирляндой переходные процессы имеют различные временные параметры. Диагностический импульс при нахождении поврежденной гирлянды в конце участка представлен на рисунке 5. Моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , t_4 характеризуют заряд и разряд напряжения диагностического импульса на поперечные и продольные составляющие линии.

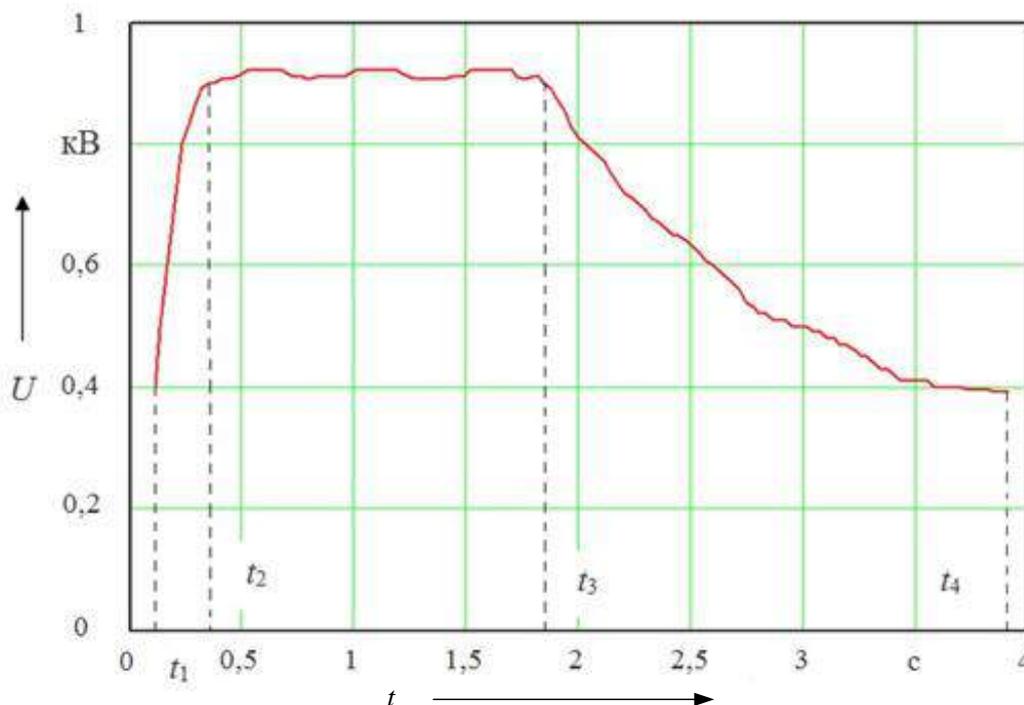


Рисунок 5 – Диагностический импульс при нахождении неисправной гирлянды в конце участка

На промежутке (t_1, t_2) напряжение возрастает от минимального значения до максимального. Параметры A и B характеризуют аperiodический переходный процесс нарастания импульса и представляют собой постоянную составляющую и амплитуду исследуемого импульса. Параметр δ_1 характеризует степень нарастания:

$$y(t) = A - Be^{-\delta_1 t}. \quad (7)$$

На промежутке (t_3, t_4) амплитуда импульса уменьшается от максимального до минимального значения. При многократных испытаниях диагностический импульс (см. рисунок 5) повторяется с периодом (t_1, t_4) . Параметры C и D характеризуют аperiodический переходный процесс спада импульса и представляют собой постоянную составляющую и амплитуду исследуемого сигнала. Параметр δ_2 характеризует степень спада:

$$y(t) = C + De^{-\delta_2 t}. \quad (8)$$

Результаты обработки всех перечисленных параметров для четырех режимов работы приведены в таблице. Наиболее значимыми при определении диагностических признаков являются постоянные времени нарастания и спада импульсов δ_1 и δ_2 , а также постоянная составляющая U_0 .

Результаты обработки диагностических импульсов

| Параметр | Зависимости | | | |
|------------------|-------------|-------|-------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Um, кВ | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| U, кВ | 0,87 | 0,81 | 0,77 | 0,73 |
| U0, кВ | 0,875 | 0,809 | 0,755 | 0,71 |
| ka | 1,05 | 1,13 | 1,2 | 1,24 |
| kф | 0,99 | 1,01 | 1,02 | 1,04 |
| ky | 0,442 | 0,426 | 0,396 | 0,41 |
| δ_1 , с-1 | -1,53 | -4,28 | -8,64 | -12,1 |
| δ_2 , с-1 | -0,11 | -0,17 | -0,21 | -0,28 |

С использованием математической модели, результатов программного моделирования [10, 11] и натуральных экспериментов [7] были определены изменения пикового значения ($U_{pp} = U_{max} - U_{min}$) спада импульса в зависимости от сопротивления гирлянды изоляторов при различных расстояниях до неисправной гирлянды L_x (рисунок 6).

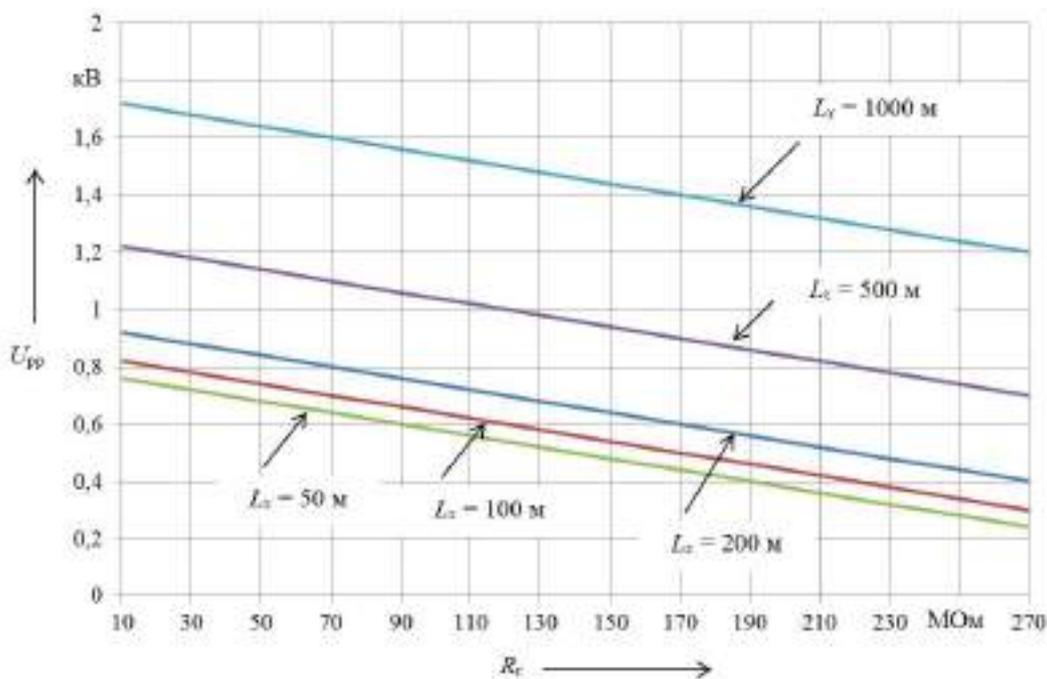


Рисунок 6 – График изменения пикового значения спада импульса в зависимости от сопротивления гирлянды при различных расстояниях до неисправной гирлянды

Выявлена также возможность определения расстояния до поврежденной гирлянды в зависимости от амплитуды диагностического импульса (рисунок 7). Расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований:

$$\delta_o = \frac{U_{mT} - U_{mЭ}}{U_{mЭ}} = 8,1 \%. \quad (9)$$

В статье рассмотрено экспериментальное исследование выявления гирлянд с неисправными изоляторами на участке КС постоянного тока. С помощью математического анализа определены численные значения параметров диагностических импульсов для исправных и неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов. Приведены зависимости, связывающие полу-

ченные численные значения диагностирующих импульсов в зависимости от местоположения гирлянды с неисправным изолятором на участке контактной сети.

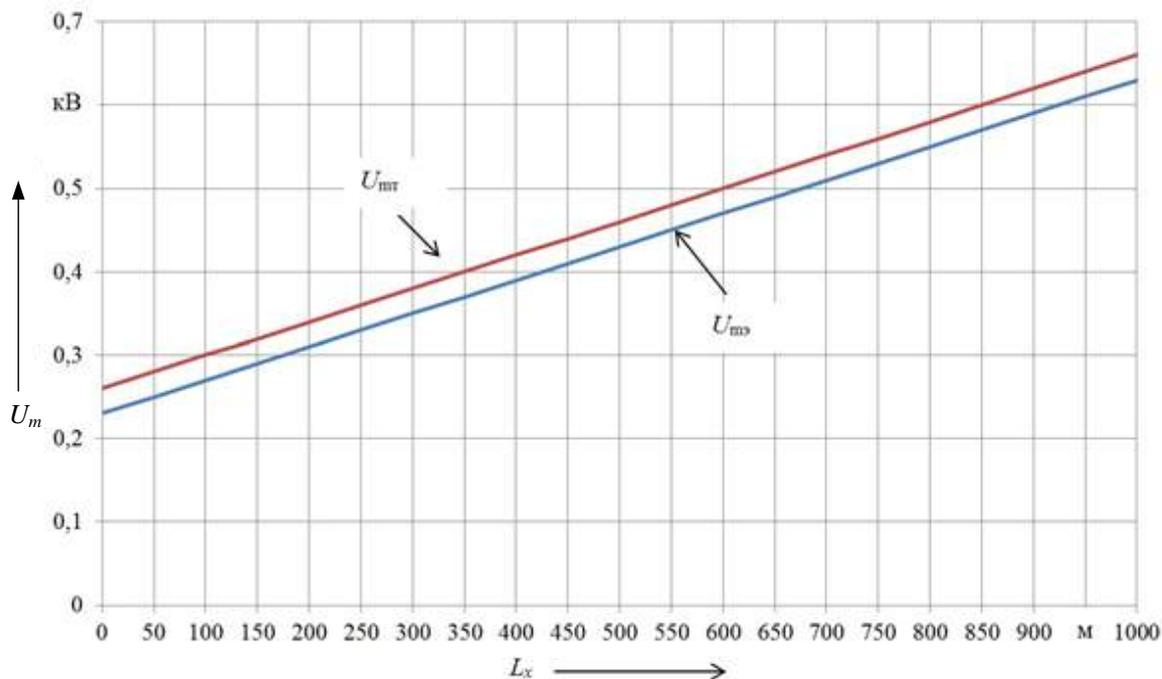


Рисунок 7 – График зависимость амплитудного значения напряжения от расстояния до поврежденной гирлянды

Предложенная методика позволяет сократить время на локализацию и замену поврежденной изоляции участка контактной сети постоянного тока и снизить экономические и трудовые затраты, связанные с процессом диагностирования.

Для достоверного определения неисправности изоляторов на участке КС рекомендуется накопление данных диагностических сигналов и последующее сравнение их с образцовыми.

Список литературы

1. Железнов, Д. Ф. Контактные сети и линии электропередач: Учебное пособие [Текст] / Д. Ф. Железнов, Д. В. Смирнов / МИИТ. – М., 2010. – Ч. 1. – 114 с.
2. Арбузов, Р. С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи [Текст] / Р. С. Арбузов, А. Г. Овсянников. – Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.
3. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). [Текст] – М.: Трансиздат, 2002. – 184 с.
4. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем: Учебное пособие [Текст] / Я. Д. Баркан. – М.: Высшая школа 1990. – 304 с.
5. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники. Учебник [Текст] / Ф. Е. Евдокимов. – М.: Высшая школа, 1981. – 488 с.
6. Исследование электростатического поля на гирляндах изоляторов контактной сети [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 54 – 59.
7. Разработка технических средств и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 4 (12). – С. 110 – 116.
8. Антонов, Ю. А. Модель взаимодействия токоприемника с контактным проводом [Текст] / Ю. А. Антонов, К. К. Ким // Наука и техника транспорта / Российская открытая академия транспорта российского университета транспорта. – М. – 2008. – № 4. – С. 9 – 12.

9. Любимов, Э. В. MathCAD. Теория и практика проведения электротехнических расчетов в среде MathCAD и Multisim [Текст] / Э. В. Любимов. – СПб: Наука и техника, 2012. – 400 с.

10. Марченко, А. Л. Основы электроники. Учебное пособие для вузов [Текст] / А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.

11. Кузьменко, А. Ю. Моделирование процесса дистанционного диагностирования изоляторов контактной сети [Текст] / А. Ю. Кузьменко, А. А. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 4 (20). – С. 92 – 97.

References

1. Zheleznov D. F., Smirnov D. V. *Kontaknyye seti i linii elektropredach. Ch.1: Uchebnoe posobie dlia studentov spetsial'nosti «Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog'»* (Contact networks and power lines. Part 1: A manual for students of the specialty «Power supply of railways»). Moscow: Moscow State University of Railway Engineering, 2010, 114 p.

2. Arbuzov R. S., Ovsianikov A. G. *Sovremennyye metody diagnostiki vozdukhnykh linii elektropredachi* (Modern methods of diagnostics of overhead power lines). Novosibirsk: Nauka, 2009, 136 p.

3. *Pravila ustroystva i tekhnicheskoi ekspluatatsii kontaknoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868). Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniia Ministerstva putei soobshcheniia Rossiiskoi Federatsii* (Rules of the device and technical operation of the contact network of electrified railways. Department of Electrification and Electricity of the Ministry of Railways of the Russian Federation). Moscow: «TRANSIZDAT», 2002, 184 p.

4. Barkan Ia. D. *Ekspluatatsiia elektricheskikh sistem: uchebnoe posobie dlia elektroenergeticheskikh spetsial'nykh vuzov* (Operation of electrical systems: a textbook for special energy universities). Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 304 p.

5. Evdokimov F. E. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Uchebnik dlia tekhnikumov. 5-e izd., pererabotannoe i dopolnennoe* (Theoretical foundations of electrical engineering. Textbook for technical schools). Moscow: Vysshaya shkola, 1981, 488 p.

6. Kuz'menko A. Iu., Kuznetsov A. A., Krotenko E. A. Investigation of electrostatic field on the insulator strings catenary [Issledovanie elektrosticheskogo polia na girliandakh izolyatorov kontaknoi seti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 54 – 59.

7. Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu., Krotenko E. A. Development of technical means and methods for monitoring the status of DC contact isolators [Razrabotka tekhnicheskikh sredstv i metodiki kontrolya sostoianiia izolyatorov kontaknoi seti postoiannogo toka]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 4 (12), pp. 110 – 116.

8. Antonov Iu. A. Model of interaction of the current collector with the contact wire [Model' vzaimodeystviia tokopriemnika s kontaktnym provodom]. *Nauka i tekhnika transporta*, 2008, no 4, pp. 9 – 12.

9. Liubimov E. V. *MathCAD. Teoriia i praktika provedeniia elektrotekhnicheskikh raschetov v srede MathCAD i Multisim* (MathCAD. Theory and practice of electrical calculations in the environment of MathCAD and Multisim) St. Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2012, 400 p.

10. Marchenko A. L. *Osnovy elektroniki. Uchebnoe posobie dlia vuzov* (Basics of electronics. Textbook for universities). Moscow: DМК Press, 2008, 296 p.

11. Kuz'menko A. Iu., Kuznetsov A. A. Simulation of the process of remote diagnosis of contact network isolators [Modelirovanie protsessa distantsionnogo diagnostirovaniia izolyatorov kontaknoi seti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 92 – 97.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7(3812) 31-06-88.

E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Кузьменко Антон Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, А. А. Методика дистанционного диагностирования подвесных фарфоровых изоляторов контактной сети постоянного тока [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 64 – 72.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU)

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

Doktor of Technical Science, Professor, head of the department «Theoretical Electrical Engineering» OSTU.

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

E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Kuzmenko Anton Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Technical Sciences, Senior lecturer of the department «Theoretical Electric Engineering», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu. Method of remote diagnostics suspended porcelain insulator dc catenary. Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies, 2019, no. 1 (37), pp. 64 – 72.

УДК 662.7

Ю. Г. Малиновский

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКИХ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ВАГОНРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация: Изучена проблема утилизации отработанных моющих растворов в вагоноремонтных депо Российской Федерации. Отмечается важность совместного решения экологических и энергетических задач для железнодорожной отрасли и низкий уровень развития и применения соответствующих технологий в депо в настоящее время. Анализируются экономические, юридические и технологические аспекты рассматриваемой проблемы. Показано, что в существующих условиях целесообразно и экономически выгодно проводить очистку моющих растворов в рамках замкнутого цикла оборота воды на предприятии с одновременным концентрированием отходов безреагентными способами и их дальнейшим использованием. Отмечается, что выделенные из отработанных растворов загрязнения содержат преимущественно горючие нефтепродукты. Предлагается сжигать концентрат загрязнений с получением тепловой энергии. Выполнен обзор методов безреагентного концентрирования и сжигания концентрата. Отмечена возможность повышения энергетической эффективности процесса депоовского ремонта вагонов за счет использования выделившейся тепловой энергии. Приведены теоретические обоснования выбранных подходов и результаты проверочных экспериментов, а также оценки экономического эффекта от внедрения предложенной технологии утилизации. Показана ее реализуемость и практическая значимость. Даны рекомендации по конструктивному исполнению депоовского моечного оборудования и очистных сооружений. Отмечена необходимость и показаны пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: очистка воды, утилизация отходов, нефтепродукты, коллоидные системы, вагоноремонтное производство, рациональное природопользование, энергоэффективность, технология топлива.

Yuriy G. Malinovskiy

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

USING THE LIQUID OIL-CONTAINING WASTE PRODUCTS OF RAILWAY DEPOTS FOR HEAT ENERGY GENERATION

Abstract: The used liquid wash solutions utilization problem in railway depots of Russian Federation was overviewed. Postulated, that it is important to solve ecological and energy efficiency problem together on railways. Authors shows, that in this moment level of development and using resource saving technology in railway depots is too low. Economical, juridical and technological aspect of this problem was analyzed. Shows, that in present conditions we need to treat wash solutions in the closed water recycling process. Simultaneously waste products must be concentrated and then used, taking into consideration, that concentrated waste products contains flammable oil-products. Proposed to combust it and generate heat energy. Taking review of oil-containing waste products concentration and combustion methods. Shows, that heat energy can be used for grows up energy efficiency of railway depots. Described theoretical basics, results of carried experiments, and economic effect was estimated. It's proved, that proposed technology is useful and can be realized. Preferred construction of washing machines and waste treatment facilities are recommended. Ways of next research work are selected and proved.

Keywords: waste water treatment, waste products utilization, oil products, colloid systems, wagon repair, resource saving, energy efficiency, fuel technology.

Железнодорожный транспорт составляет основу транспортной инфраструктуры Российской Федерации и связывает большинство городов. Благодаря этому большая часть населения проживает в непосредственной близости от железной дороги, а во многих населенных пунктах железнодорожная инфраструктура является градообразующей. С переходом к рыночным отношениям железнодорожная отрасль, как и все остальные участники экономической деятельности, ощущает необходимость в снижении затрат. В связи с этим руководство отрасли ставит снижение затрат как стратегическую задачу, т. е. задачу, требующую системного подхода, привлечения научного, производственного и рыночного потенциала для своего решения.

В силу географической близости железнодорожных предприятий и мест компактного проживания людей первые оказывают существенное влияние на энергосистему и экосистему населенных пунктов. Для самих предприятий это влияние имеет стоимостное выражение, т. е. представляет собой те самые затраты, которые необходимо уменьшать. Отсюда заключаем, что проблемы утилизации отходов и повышение энергоэффективности предприятий продуктивно рассматривать в комплексе. Не случайно в Энергетической стратегии ОАО «РЖД» вопросы экологии органично включены в структуру документа. Стоит добавить, что помимо прямых затрат на утилизацию отходов и потребляемые энергоносители необходимо учитывать также штрафы за несоответствующие показатели предприятия по экологичности и энергоэффективности. Так как существует тенденция к повышению требований со стороны регуляторов и ужесточению ответственности предприятий, то важность решения энергетических и экологических проблем, актуальность исследований в данном направлении становятся очевидными.

Данное исследование проводится в отношении предприятий по ремонту грузового подвижного состава, вагоноремонтных предприятий (ВРП). Отправной точкой исследования явилась проблема утилизации отходов моечных машин. Однако по причинам, изложенным в начале статьи, проблемное поле было расширено и включило в себя повышение энергоэффективности ремонта, так как эти процессы допускают взаимную оптимизацию. Результаты предыдущих этапов исследований, такие как анализ экономических и юридических ограничений технологии их очистки, а также исследования химического состава отходов были представлены автором, в частности, в статье [1, 2]. Было показано, что

существующие технологии очистки не способствуют формированию экономических стимулов к организации замкнутого цикла водоснабжения предприятия. При низкой цене на чистую воду от городских водоснабжающих сетей эти технологии оказываются экономически невыгодными за счет того, что на каждом этапе, включая очистку воды и утилизацию выделенных из нее загрязнений, требуют от ВРП расходов на оборудование, реагенты и заработную плату сотрудников. При этом положительный экономический эффект отсутствует, так как выделенные загрязнения никак повторно не используются. При этом ряд отраслевых и федеральных документов, например, [3 – 5], определяет достаточно жесткие правила обращения с отходами, сужая поле для маневра в рамках существующих возможностей. Таким образом, в отрасли ремонта железнодорожных вагонов существует очевидный запрос на поиск пути снижения затрат, а по возможности – получения прибыли от повторного использования отходов.

Описанная проблема формирует цель исследования как разработку энергетически выгодной технологии утилизации отработанных моющих растворов (ОМР). Задачами по достижению этой цели являются исследование ОМР как объекта утилизации, сравнительный анализ методов концентрирования и исследование технологии топлива в отношении концентрата.

В данной статье рассматривается термическое обезвреживание как способ, одновременно позволяющий утилизировать отходы и получать тепловую энергию. При этом снизится потребление энергии извне. Так мы оптимизируем сразу два показателя – энергоэффективность и удельный объем выбросов, отнесенный к количеству отремонтированных вагонов. Условие экономической эффективности способа при этом сводится к достаточной теплотворной способности ОМР и невысокой стоимости необходимого оборудования.

Проведем оценочные расчеты: согласно документу [6, с. 184] моющий раствор может содержать до 10 % по массе смазки ЛЗ-ЦНИИ. Состав этой смазки определяется ГОСТом [7], согласно которому смазка содержит преимущественно предельные углеводороды (УВ) и жирные кислоты, которые ввиду большой длины углеводородной цепи по теплотворной способности близки к УВ. Количество смазки на единицу продукции определяется нормами расхода [6, с. 66 – 68] и составляет 6, 7 кг на один вагон. Программа ремонта среднего депо – восемь вагонов в смену, или 240 вагонов в месяц. Таким образом, среднее ВРП имеет округленно 1500 кг нефтепродуктов в месяц с теплотой сгорания около 40 МДж/кг [8], что дает энергетический резерв в 60 ГДж, или 14 Гкал. Основным круглогодичным потребителем тепловой энергии в ВРП являются моечные машины КРЦ с суммарной средней мощностью 60 кВт. За 30 рабочих дней при 12-часовой смене их потребление составит около 77 ГДж. Видно, что сжигание загрязнений в оптимальных условиях позволяет в значительной мере (примерно на 80 %) покрыть расходы тепла моечного участка и сэкономить энергоресурсы. Положительный экономический эффект при этом будет складываться из экономии на утилизации в размере 150 тыс. руб. в месяц и экономии на электроэнергии в размере около 80 тыс. руб. в месяц при стоимости одного киловатт-часа около 4 руб.

Непосредственно сжигать ОМР невозможно ввиду большого содержания воды. Следовательно, необходимо рассмотреть иные способы сжигания таких отходов. Известны и описаны, например, в статье [9], различные способы сжигания совместно с иными видами топлива, такими как мазут, газ, уголь. При этом раствор либо смешивается с топливом, либо вводится непосредственно в топку котла. Первый способ применяется для мазутных котлов, в которых используется мазутно-водная эмульсия. Преимуществом эмульсии перед чистым мазутом можно считать более полное сгорание за счет вторичного диспергирования мазута вскипающими каплями воды. Второй способ удобнее применять в котлах на газообразном и твердом топливе, вводя отходы с помощью форсунок в пламя либо направляя их на раскаленные элементы котла.

Применение ОМР вместо воды можно рассматривать как один из путей их утилизации, так как многие ВРП оснащены котельными. Однако у этого пути есть недостатки. В частности, соотношение отходов и топлива даже с применением специальных кавитаторов для приготовления водно-мазутной эмульсии не может быть выше 25 % по причине больших затрат тепла на испарение воды и выхода котла из расчетного режима работы [10]. При этом ОМР образуются в достаточно больших количествах: для сжигания месячного объема в 20 м³ отходов потребуется около 75 – 80 т мазута, что составляет расход последнего за один зимний месяц. С газовыми и угольными котельными ситуация обстоит аналогичным образом. Очевидно, отработанные растворы требуется концентрировать.

По экономическим соображениям, приведенным в статьях [1, 2], концентрирование должно выполняться недорогим, безреагентным автоматизированным методом. Предлагается, например, в статье [11], использовать для этих целей электрофлотацию. Преимуществами предложенного подхода можно считать возможность работы в горячих растворах, высокую скорость отделения загрязнений, низкие затраты электроэнергии, меньший размер отделяемых коллоидных частиц и легкость удаления шлама в сравнении с реагентной флотацией, недостатками – образование в ходе процесса горючего и взрывоопасного водорода, высокую стоимость оборудования и необходимость настройки параметров процесса, так как размеры пузырьков водорода, оптимальные ток и напряжение процесса, а значит и результативность флотации зависят от рН.

Для разложения эмульсии также возможно применять электролиз. При этом требуются повышенные ток и напряжение, возрастают энергозатраты. Однако электролиз образующих коллоидную систему карбоновых кислот переводит их в нерастворимые углеводороды [12], благодаря чему коагуляция происходит очень быстро и в высокой степени. При этом не происходит повышения рН, так как образующийся при электролизе кислот углекислый газ образует раствор карбонатов, а не гидроксидов щелочных металлов. Электролиз также можно использовать в горячих растворах. Однако и этому методу присущи недостатки: растворение анода, загрязнение обоих электродов продуктами электролиза, что приводит к нестабильности параметров процесса и образованию газов.

Рассматривали концентрирование дистилляцией. Существенным недостатком метода признана его энергозатратность. Применение вакуум-выпаривания, описанного, например, в патенте [13], ограничено экономическими и технологическими причинами. Для компенсации энергозатратности предложено накапливать энергию, выделяющуюся при конденсации, для последующего использования, а также получать энергию для дистилляции путем сжигания концентрата. Данный способ сопровождается серьезными технологическими трудностями, такими как большой объем емкости с теплоносителем, необходимость подводить большие мощности к небольшому объему ОМР в дистилляторе, интенсивное образование пены, осаждение концентрата на стенках испарителя и т. д. Однако дистилляция дает возможность не только получить высокое качество очистки воды, но и организовать своего рода «тепловой трансформатор-накопитель», позволяющий преобразовывать различные виды бросовой и неудобной для применения энергии в тепловую, запасенную в горячей воде и паре. Такую воду можно применять как теплоноситель во многих технологических процессах, двигаясь от «горячих» к более «холодным». Например, выполнять нагрев моечных машин КРЦ водой с температурой 95 – 100 °С, после частичного остывания (70 °С) направлять теплоноситель на нагрев моечной машины тележек, далее – на отопление и термостабилизацию деталей ходовой части вагона. Таким образом, метод дистилляции должен рассматриваться не изолированно, как метод лишь утилизации отходов, а как подход к управлению энергетическими ресурсами предприятия. В связи с этим автор убежден в необходимости отдельных исследований в этом направлении.

Самый простой метод – изменение температуры и растворимости загрязнений. Горячие насыщенные ОМР отводятся в отстойник-накопитель, где остывают, вследствие чего излишки загрязнителей коагулируют и отделяются с поверхности. Очищенный мойущий

раствор поступает обратно в моечные машины, где вновь нагревается и возвращает моющую способность. Преимуществами такого способа являются простота оборудования, нетребовательность в эксплуатации, низкая взрыво- и пожароопасность, недостатками – высокая концентрация остаточных загрязнений в моющих растворах, потери тепла на цикле нагрев-охлаждение раствора, а также сложный состав шлама, включающий в себя УВ, карбоновые кислоты и их соли, нерастворимые твердые включения и остаточные следы воды. Однако по экономической эффективности такой способ выглядит привлекательным, так как руководящими документами допускается достаточно высокая степень загрязнения исходного моеющего раствора [6, с. 184].

Экспериментальная часть исследования посвящена разработке отдельных этапов технологии очистки ОМР и утилизации концентрата.

На первом этапе исследования выполнено определение среднего количества ОМР, образующихся в ВРП за месяц. Для этого было организовано наблюдение за процессом смены моеющего раствора в 10 различных ВРП. Наблюдение проводилось в течение 23 месяцев: с августа 2014 г. по июнь 2016 г. включительно. Фиксировались частота смены моеющего раствора и емкость моечных машин. По итогам наблюдения были определены минимальный, максимальный и средний месячный объем ОМР, которые составили соответственно 10, 20 и 30 м³. Точность измерений не обеспечивалась и метрологически не подтверждалась, так как первичные данные были получены дистанционно в целях обслуживания моечных машин.

На втором этапе выполнено определение физико-химического состава ОМР. Выявлено, что насыщенный раствор содержит до 10 % смазки ЛЗ-ЦНИИ по массе (в зависимости от условий получения) и представляет собой устойчивую эмульсию масла в воде, стабилизированную мылом. Размеры частиц – около 30 – 40 мкм, определены под микроскопом. Заряд – отрицательный – определен методом электрофореза. рН-9,5 определен по универсальной индикаторной бумаге. Коллоидная устойчивость очень высокая, коагуляция практически не наблюдается при отстаивании в диапазоне температур 0 – 90 °С в течении шести месяцев при перемешивании, при проведении 10 циклов заморозки-разморозки. Быстрая коагуляция наступает в присутствии кислых агентов, например, кислот, кислых солей. В лабораторных условиях проводилась коагуляция с полиоксихлоридом алюминия и с серной кислотой.

На третьем этапе было выполнено моделирование процесса образования масляно-водной эмульсии в моечных машинах. Выявлено влияние условий диспергирования на стабильность составляющей ОМР эмульсии. Так, при перемешивании смазки ЛЗ-ЦНИИ в горячей воде температурой 90 °С вручную образующаяся эмульсия разлагалась на УВ и мыльный раствор практически количественно в течение трех минут. При обработке загрязненной поверхности струей высокого давления при той же температуре ОМР разлагался в течение суток. При непрерывной циркуляции полученного в предыдущем эксперименте ОМР через центробежный насос в течение одного часа формировалась эмульсия, устойчивая к отстаиванию в течение шести месяцев без заметного расслоения. Выдвинута и не опровергнута гипотеза о том, что процесс кавитации приводит к образованию настолько малых частиц дисперсной фазы, что коагуляция и седиментация практически прекращаются. Подтверждение такого механизма образования эмульсии ОМР найдено в работе коллег, проводящих аналогичные исследования [14]. Выделение концентрата из модельных и рабочих растворов для его последующего анализа и сжигания проводилось методом выпаривания при температуре 100 °С и атмосферном давлении.

На четвертом этапе проводили выделение концентрата загрязнений перечисленными выше способами: электролиз, дистилляция, отстаивание. Электрофлотация не проводилась ввиду отсутствия необходимого оборудования.

Электролиз насыщенного раствора проводился при температуре 75 °С, материал электродов – сталь 3, род тока – постоянный, напряжение варьировалось от 0,5 до 30 В.

Отмечено интенсивное выделение концентрата, но при этом наблюдается разрушение и загрязнение электродов (преимущественно анода), что согласуется с теорией процесса. Развитие этого метода, теоретическая проработка, оптимизация режимов электролиза и конструктивная проработка заслуживают внимания и будут выделены в отдельное направление исследования.

Дистилляцию проводили в лабораторных условиях на уменьшенной модели. Выполнена модель дистиллятора в масштабе 1:1000 от требуемой производительности. Объем – 0,5 л, мощность – 250 Вт. Достигнуто концентрирование ОМР до соотношения «вода : загрязнения» как 1:1. Показано, что при дальнейшем концентрировании текучесть концентрата оказывается недостаточной для беспрепятственного удаления из дистиллятора.

Отстаивание изучалось с учетом данных о моделировании ОМР путем сравнения моечного оборудования разных конструкций, расположенного в двух разных депо. В первом депо моечное оборудование оснащено собственными баками сравнительно малого объема (от 1 до 3 м³), в которых рабочий раствор циркулирует в течение всей смены. Во втором депо моечное оборудование собственных баков не имеет, слив ОМР идет непосредственно в отстойник объемом 6 м³, содержащий одну перегородку с нижним переливом. В первом объеме идет отстаивание и расслоение эмульсии ОМР и отделение нефтепродуктов в верхний слой. Во второй объем переходит только нижний, водный слой, откуда он и забирается насосом для дальнейшей обмывки. Моечное оборудование первого типа давало ОМР в виде устойчивой эмульсии, требующей дополнительного разделения. Оборудование второго типа без дополнительного воздействия давало ОМР, разделенный на два слоя: концентрат углеводородных загрязнений и водный раствор мыла. Очевидно, что оборудование второго типа значительно облегчает задачу выделения концентрата для его последующего использования. При этом концентрат представлял собой веретеное масло, сохраняющее текучесть и прозрачность, что косвенно говорит о достаточной степени его чистоты для использования в качестве топлива непосредственно. Анализ состава концентрата запланирован, но на данный момент не проводился.

По условиям чистоты и текучести концентрат, полученный таким способом, в качестве топлива более предпочтителен, чем концентрат, полученный флотацией или электролизом. Однако в силу химических реакций, проходящих на электродах, при электролизе достигается более полное извлечение из воды жирных кислот, составляющих значительную часть сгораемых загрязнений.

Описанные результаты позволяют давать рекомендации по конструктивному исполнению моечного оборудования КРЦ: эмульсия, образующаяся после обмывки деталей, должна поступать обратно к насосам моечных машин не сразу, а через отстойник такого объема, который обеспечит отстаивание в спокойном состоянии в течение минимум 3 мин, а лучше – 1 ч. Оценим этот объем: за один час через демонтажный участок проходит около 10 колесных пар. Суммарное время работы насосов – около 30 мин, или 0,5 ч. Суммарная производительность насосов – не менее 30 м³/ч. Таким образом, емкость отстойника требуется от 1,5 до 30 м³.

Для реализации следующего этапа технологической схемы проводился эксперимент по сжиганию концентрата в вихревой печи. Вихревая печь была выбрана по причине высокой эффективности при сжигании тяжелого топлива, которое трудно газифицируется [15]. Подача разогретого до температуры плавления топлива (90 °С) осуществлялась самотеком в горячую часть воздуховода, где происходила газификация за счет разогрева до высокой температуры и смешение с воздухом, что обеспечивает полноту сгорания [16]. Воспламенение происходило внутри воздуховода. Регулируя поток топлива путем подбора сливного отверстия, добивались без сажевого горения. Полученное в ходе горения тепло отводилось с помощью водяного теплообменника, имеющего тепловой контакт с корпусом печи. По всей площади корпус печи был теплоизолирован слоем минеральной ваты толщиной 50 мм. Горение продолжали 1 ч для выхода на установившийся режим работы и

удобства пересчета величин. Мощность печи измерялась по изменению температуры воды в системе. Схема использованной в эксперименте печи приведена на рисунке, параметры ее работы отражены в таблице.

Таким образом, подтверждена возможность сжигания концентрата с получением тепловой энергии. Однако следует отметить, что конструкция печи, параметры горения, способ съема тепла и измерения мощности также требуют оптимизации, так как полученная в результате эксперимента теплотворная способность топлива 28 МДж/кг оказалась значительно ниже справочной 40 МДж/кг для данного вида топлива.

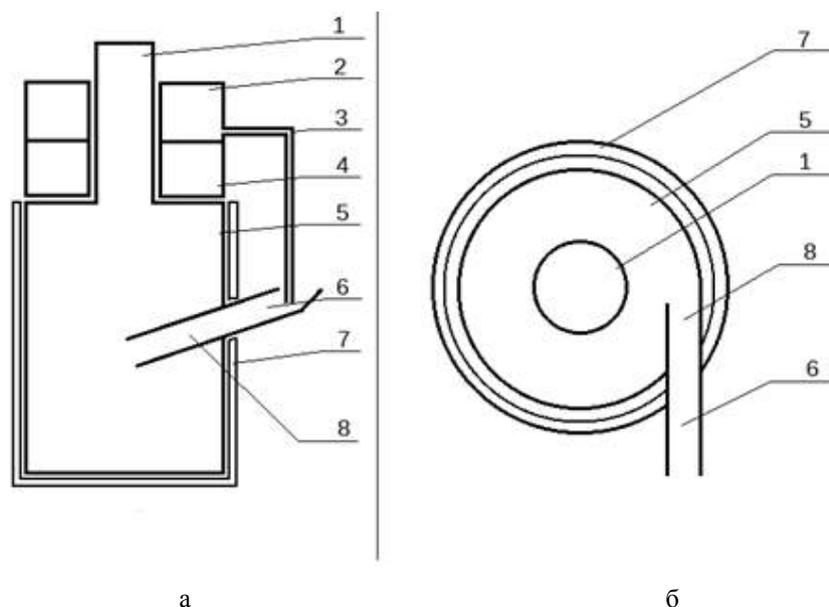


Схема вихревой печи: а – вид сбоку; б – вид сверху;

1 – дымоход; 2 – кольцевой бак для топлива; 3 – трубка подачи топлива; 4 – кольцевой теплообменник;
5 – камера сгорания; 6 – воздуховод; 7 – теплоизоляция; 8 – зона газификации топлива

Параметры работы вихревой печи

| Наименование параметра | Ед. измер. | Значение |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Расход топлива | кг/ч | $6,5 \cdot 10^{-2}$ |
| Расход воздуха | $\text{м}^3/\text{ч}$ | $9,2 \cdot 10^{-1}$ |
| Полезная мощность | кВт | $5,1 \cdot 10^{-1}$ |
| Теплотворная способность топлива | МДж/кг | 28 |

Описанное в данной работе исследование имеет в первую очередь прикладное значение для решения актуальной проблемы железнодорожной отрасли. В ходе проделанной работы предложена технологическая схема, включающая в себя накопление ОМР, их концентрирование с последующим сжиганием концентрата и получением тепловой энергии. Проведены эксперименты для установления количественных характеристик процессов. На основании их анализа определены наиболее перспективные направления работы. Установлена необходимость безреагентного концентрирования ОМР, выполнен обзор возможных способов, в том числе даны и обоснованы рекомендации по конструктивному исполнению моечного оборудования и очистных сооружений. Полученный концентрат предлагается сжигать без дополнительной обработки в печах специальной конструкции, выделившееся тепло направлять на подогрев рабочих моющих растворов. Описанные этапы технологии были воспроизведены экспериментально, что указывает на ее реализуемость.

Исследование не является завершенным, в статье рассматриваются приближенные количественные величины, рамочные эксперименты и общие теоретические заключения. В ходе дальнейшей работы предполагается провести ряд экспериментов, направленных на оптимизацию исследуемых процессов. Далее предполагается создание экспериментальной установки, внедрение ее на ВРП с оптимизацией параметров энергоэффективности и экономической эффективности. Экономический эффект оценивается в размере около 200 тыс. руб. в месяц на одно ВРП.

Таким образом, на данном этапе показано, что использование ОМР в качестве топлива имеет большую практическую и научную значимость и представляет широкое поле для междисциплинарных исследований. Разработан план дальнейшей работы. В контексте темы настоящей статьи можно заключить, что проведенные исследования показали практическую возможность и экономическую целесообразность утилизации отработанных моющих растворов с целью повышения энергоэффективности ремонта подвижного состава.

Список литературы

1. Малиновский, Ю. Г. Обзорное исследование проблем рационального использования ресурсов в вагоноремонтных предприятиях Российской Федерации [Текст] / Ю. Г. Малиновский // Материалы XXII междунар. экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий» / Новосибирский гос. ун-т. – Новосибирск, 2017. – С. 203.
2. Малиновский, Ю. Г. Очистка и утилизация сточных вод железнодорожных вагоноремонтных депо [Текст] / Ю. Г. Малиновский, Р. А. Ахмеджанов, О. А. Реутова // Материалы всерос. науч.-практ. конф. «Омские научные чтения» / Омский гос. ун-т. – Омск, 2017. – С. 1153.
3. ВНТП 08-90. Нормы технологического проектирования депо по ремонту грузовых вагонов [Текст]. – М: Транспорт, 1992. – 32 с.
4. Закон Российской Федерации «Федеральный закон «Об отходах производства и потребления»» от 24.06.1998 № 89-ФЗ [Текст] // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. – М., 1998. – 34 с.
5. Закон Российской Федерации «Федеральный закон «О лицензировании отдельных видов деятельности»» от 04.05.2011 № 99-ФЗ [Текст] // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. – М., 2011. – 24 с.
6. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1540) мм. Введ. 2018-01-01. [Текст] / ВНИИЖТ. – М., 2018. – 242 с.
7. ГОСТ 19791-74 Смазка железнодорожная ЛЗ-ЦНИИ. Технические условия [Электронный ресурс] / Техэксперт URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200008590> (дата обращения: 17.05.2018).
8. Земский, Г. Т. Огнеопасные свойства неорганических и органических материалов: Справочник [Текст] / Г. Т. Земский / ВНИИПО. – М., 2016. – 971 с.
9. Огневой метод: Термическое обезвреживание (сжигание) сточных вод [Электронный ресурс] // EcologyTarget URL: <http://www.ecologytarget.ru/tarecs-718-1.html> (дата обращения: 17.05.2018).
10. Федорова, У. Д. Эффективность использования водно-мазутных эмульсий в котельных агрегатах [Электронный ресурс] / У. Д. Федорова, Е. А. Лебедева // Материалы V междунар. студенческой электронной конференции «Студенческий научный форум 2013» / Российская академия естествознания. – М., 2013. URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/4682.pdf> (Дата обращения 14.08.2018).
11. Анализ методов локальной очистки сточных вод [Текст] / В. Ф. Бабкин, Е. П. Евсеев и др. // Экология производства. – М.: Отраслевые ведомости. – 2010. – № 10. – С. 73 – 77.

12. Шабаров, Ю. С. Органическая химия: Учебник [Текст] / Ю. С. Шабаров. – М.: Химия, 1994. – Ч. 1. – 439 с.
13. Пат. 2389737 Российская Федерация, МПК C08J 11/00. Установка для утилизации твердых и/или жидких нефтесодержащих отходов [Текст] / Щеблыкин И. Н.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Технопротект». – 2008120319/15; заявл. 23.05.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.
14. Очистка нефтезагрязненных вод на предприятиях ОАО «ВРК-2» [Текст] // Вагоны и вагонное хозяйство / ОАО «РЖД». – М. – 2014. – № 2. – С. 33.
15. Геллер, З. И. Мазут как топливо [Текст] / З. И. Геллер. – М.: Недра, 1965. – 496 с.
16. Парамонов, А. М. Повышение эффективности сжигания мазута в нагревательных печах кузнечного и термического производства [Текст] / А. М. Парамонов // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2018. – № 1 (157). – С. 28 – 31.

References

1. Malinovskiy Y. G. Review the problem of effective resource using in the Russian Federation railway depots [Obzornoe issledovanie problem racional'nogo ispol'zovaniya resursov v vagonoremontnyh predpriyatiyah Rossiyskoy Federacii]. *Materialy XXII mezhdunarodnoi ekologicheskoi studencheskoi konferencii «Ekologiya Rossii i sopredel'nyh territorii»* (Abstracts of XXII Int. ecological student conference «Ecology of Russia and near placed countries»). Novosibirsk, 2017, p. 203.
2. Malinovskiy Y. G., Akhmedzhanov R. A., Reutova O. A. The waste water treatment and recycling from the railway car-repair depots [Ochistka i utilizaciya stochnyh vod zheleznodorozhnyh vagonoremontnyh depo]. *Materialy Vserossiyskoi nauchno-prakticheskoi konferencii «Omskie nauchnye chteniya»* (The materials of International scientific and applied conference «Omsk scientific readings»). Omsk, 2017, pp. 1118 – 1120.
3. *VNTP 08-90. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya depo po remontu gruzovyh vagonov* (Rules of technological projecting of railway depots VNTP 08-90), Moscow, Transport publ. 1992, 32 p.
4. *Zakon Rossiyskoi Federacii «Federal'nyi zakon «Ob othodah proizvodstva i potrebleniya»» 24.06.1998 № №89-FZ* (Russian Federation act «Federal law «About waste products of producing and consumption»» 24.06.1998 № №89-FL), Moscow, The President and government of Russian Federation acts compilation, 1998, 34 p.
5. *Zakon Rossiyskoi Federacii «Federal'nyi zakon «O licenzirovanii otdel'nyh vidov deyatel'nosti»» 04.05.2011 № № 99-FZ* (Russian Federation act «Federal law «About licensing special types of activity»» 04.05.2011 № № 99-FL), The President and government of Russian Federation acts compilation, 2011, 26 p.
6. *Rukovodyashiy dokument po remontu i tehničeskomu obsluzhivaniyu kolesnyh par s byksovyimi uzlami gruzovyh vagonovmagistral'nyh zheleznyh dorog kolei 1520 (1540) mm* (Rules of repair and technical support of wheelset for cargo wagons on railway with wideness 1520 (1540) mm), Moscow, VNIIZHT publ. 2018, 242 p.
7. *Smazka zheleznodorozhnaya LZ-TSNII. Tehničeskie usloviya, GOST 19791-74* (Railway lubricant LZ-TSNII. Technical requirements, State standart 19791-74). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200008590> (date of request: 17.05.2018).
8. Zemskiy G. T. *Ogneopasnye svoystva neorganicheskikh i organicheskikh materialov* (Flameness properties of inorganic and organic materials). Moscow: VNIPO publ., 2016, 971 p.
9. Flame method: The thermal utilization of waste water [Ognevoy metod: Termicheskoye obezvrezhivanie (szhiganie) stochnyh vod], *EcologyTarget – EcologyTarget*, URL: <http://www.ecologytarget.ru/tarecs-718-1.html> (date of request: 17.05.2018).
10. Fyodorova U. D., Lebedeva E. A. Efficiency of using water-in-heating oil emulsions in boilers [Effectivnost' ispol'zovaniya vodno-mazutnyh emul'siy v kotel'nyh agregatah]. *Materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi elektronnoi konferencii «Studencheskiy nauchnyi forum 2013»*

(Abstracts of V Int. student conference «Students scientific forum 2013»). URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/4682.pdf> (date of request 14.08.2018)

11. Babkin V. F., Evseev E. P., Zlobina N. N., Nenno V. E., Seydaliev G. S., Stupin V. I., Chubirko M. I. Analysis of local waste water threatment methos [Analiz metodov lokal'noy ochistki stochnyh vod]. *Ekologiya proizvodstva – Industrial ecology*, 2010, no 10, pp. 73 – 77.

12. Shabarov Y. S. *Organicheskaya himiya. Chast` 1* (Organic chemistry. Part 1). Moscow: Himiya publ., 1994, 439 p.

13. Sheblykin I. N. Patent RU 2389737 C2, 20.05.2010.

14. Oil wasted water treatment on OAO «VRK-2» enterprises [Ochistka neftezagryaznennyh vod na predpriyatiyah OAO «VRK-2»]. *Vagony i vagonnoe hozyaistvo – Wagons and rolling stock*, 2014, no. 2, p. 33.

15. Geller Z. I. *Mazut kak toplivo* (Heating oil as a fuel). Moscow: Nedra publ., 1965, 496 p.

16. Paramonov A. M. Increasing efficiency of heating oil burning in heating stoves of forge and thermal enterprises [Povyshenie effektivnosti szhiganiya mazuta v nagrevatel'nyhpechah kuznechnogo i termicheskogo proizvodstva]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk science herald*, 2018, no. 1 (157). pp. 28 – 31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Малиновский Юрий Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7-965-977-0234.

E-mail: malinomsk@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Malinovskiy Yuriy Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. candidate in Technical Science of the Department «Wagons and rolling stock», OSTU.

Phone: +7-965-977-02-34.

e-mail: malinomsk@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Малиновский, Ю. Г. Использование жидких нефтесодержащих отходов вагоноремонтных предприятий для генерации тепловой энергии [Текст] / Ю. Г. Малиновский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 72 – 81.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Malinovskiy Y. G. Using the liquid oil-containing waste products of railway depots for heat energy generation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 72 – 81 (In Russian).

УДК 621.331

Ю. В. Москалев

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКОВ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК И ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. В статье рассмотрен подход, который позволяет уменьшить несимметрию потребляемых токов тяговыми подстанциями железных дорог из трехфазной системы электроснабжения с использованием компенсирующего устройства с несимметричной структурой. Реактивные токи компенсирующего устройства позволяют перераспределять между фазами тягового трансформатора активную и реактивную мощность несимметричной тяговой нагрузки и получать симметричную нагрузку трехфазной системы электроснабжения. Предложена теорема для определения проводимостей и реактивных токов ветвей компенсирующего устройства с несимметричной структурой в зависимости от тяговых нагрузок. В статье приведены расчетные выражения, с использованием которых можно вычислить проводимости и реактивные токи вет-

вей компенсирующего устройства для любой тяговой нагрузки фидерных зон, при которых эквивалентная нагрузка, включающая в себя реактивные токи ветвей устройства и токи фидерных зон, будет симметричной и активной. В качестве примера применения теоремы и предложенных выражений приведена тестовая задача, в которой рассмотрена вторичная обмотка тягового трансформатора с несимметричной тяговой нагрузкой фидерных зон, рассчитаны проводимости ветвей устройства. С использованием векторных диаграмм показано получение симметричной системы токов вторичной обмотки тягового трансформатора. Приведены математические выражения, позволяющие реализовать необходимый закон регулирования реактивных токов устройства. Определены необходимые диапазоны регулирования реактивных токов компенсирующего устройства на тяговой подстанции по заданным вероятностным законам изменения тяговых нагрузок. Рассмотрены несколько вариантов для реализации такого технического средства.

Ключевые слова: тяговая сеть, переменный ток, реактивная мощность, компенсирующее устройство, потери мощности, несимметричная система токов

Yuriy V. Moskalev

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

DEFINITION RANGES OF CURRENT REGULATION COMPENSATING DEVICE TO REDUCE THE UNBALANCE OF THE TRACTION LOADS AND IMPROVE THE POWER FACTOR OF THE TRACTION SUBSTATION ALTERNATING CURRENT RAILWAYS

Abstract. The article considers an approach that allows to reduce the asymmetry of consumed currents by traction substations of railways from a three-phase power supply system using a compensating device with an asymmetric structure installed at the substation. Reactive currents of the compensating device allow to redistribute between phases of the traction transformer active and reactive power of asymmetric traction load and to receive symmetric load of three-phase power supply system. The theorem is proposed to determine the conductivities and reactive currents of the branches of a compensating device with an asymmetric structure depending on the traction loads. The article presents the calculated expressions, which can be used to calculate the conductivity and reactive currents of the branches of the compensating device for any traction load of the feeders, in which the equivalent load, including the reactive currents of the branches of the device and the currents of the feeder zones will be symmetrical and active. As an example of the application of the theorem and the proposed expressions, a test problem is presented in which the secondary winding of a traction transformer with asymmetric traction load of feeders is considered, the conductivity of the branches of the device is calculated. With the use of vector diagrams shows the receipt of a symmetrical system of currents of the secondary winding of the traction transformer. Mathematical expressions allowing to realize the necessary law of regulation of reactive currents of the device are given. The necessary ranges control of reactive currents of the compensating device on traction substation on the set probabilistic laws of change of traction loadings are defined. Various options for the practical implementation of a compensating device that will provide the necessary inductive or capacitive current of each branch are considered.

Keywords: traction network, alternating current, reactive power, compensating device, power losses, asymmetrical currents system

При электрификации железных дорог в стране значительное распространение получила система тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц. Для подключения к системе внешнего электроснабжения используются трехфазные трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда» – «треугольник» [1], при этом одна фаза тягового трансформатора и системы внешнего электроснабжения остается незагруженной, что является причиной известных негативных последствий [1 – 5]. С учетом того, что активные и реактивные составляющие токов тяговой нагрузки каждой фидерной зоны изменяются во времени случайным образом, это приводит к возникновению в некоторые моменты времени значительной несимметрии токов и напряжений тяговых трансформаторов и системы внешнего электроснабжения [2, 5].

В настоящее время известны различные организационные и технические мероприятия для улучшения условий взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения, снижения потерь мощности, уменьшения негативного кондуктивного и индуктивного взаимовлияния этих систем [5 – 9]. К нескольким часто используемым мероприятиям для систем тягового электроснабжения переменного тока можно отнести чередование фаз при подклю-

чении к линиям электропередачи трансформаторов тяговых подстанций [1, 4], использование устройств для регулирования напряжения тяговых трансформаторов [1 – 3], применение компенсирующих устройств (КУ) [5, 10] и фильтров различных типов [5, 6, 8, 9], размещение устройств раздела питания [7] и др.

Существуют также более затратные способы, например, изменение системы питания тяговой сети с использованием специальных трансформаторов [1, 3, 11, 12] или полупроводниковых преобразователей [11, 12].

В системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц часто используют КУ, которые устанавливают на межподстанционной зоне, тяговой подстанции [1, 5], непосредственно на электроподвижном составе переменного тока [9]. При проектировании КУ стремятся увеличить количество его функций, т. е. использовать для компенсации реактивной мощности, снижения потерь и улучшения качества электроэнергии.

Рассмотрим подход для повышения эффективности использования КУ на тяговой подстанции, при котором реактивные токи КУ позволят обеспечить симметричную активную нагрузку тягового трансформатора и системы внешнего электроснабжения.

Для пояснения предлагаемого подхода приведем и докажем следующую теорему.

Теорема. Для любой линейной несимметричной трехфазной нагрузки, соединенной в схему «треугольник», существуют линейные реактивные элементы, включенные параллельно с нагрузкой в схему «треугольник», при которых эквивалентная проводимость реактивных элементов и нагрузки будет симметричной и активной.

При доказательстве теоремы примем несколько допущений: идеальные источники ЭДС образуют симметричную трехфазную систему, по ветвям КУ протекают только реактивные токи, в схемах замещения все элементы линейные.

Доказательство. Для доказательства предложенной теоремы рассмотрим схемы, приведенные на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 показан трехфазный источник ЭДС, соединенный треугольником (ЭДС E_{AB} , E_{BC} , E_{CA}), трехфазная нагрузка (комплексные проводимости Y_4 , Y_5 , Y_6) и КУ (комплексные проводимости Y_7 , Y_8 , Y_9). Необходимо определить проводимости ветвей КУ, для которых эквивалентная нагрузка будет симметричной и активной, т. е. будет иметь одинаковые действительные составляющие проводимостей по фазам (см. рисунок 2).

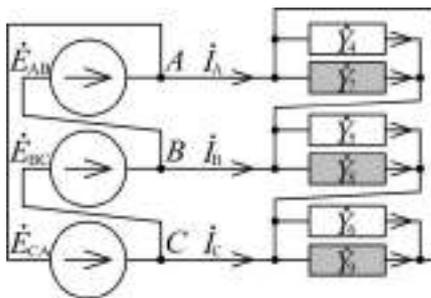


Рисунок 1 – Схема замещения трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой и КУ

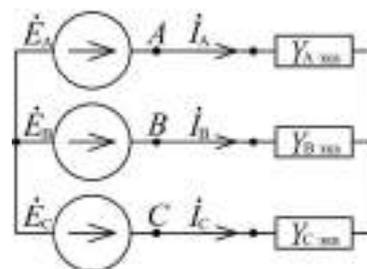


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения трехфазной цепи с симметричной нагрузкой

Для схемы замещения на рисунке 1 с использованием законов Кирхгофа можно составить систему уравнений для определения линейных токов:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{E}_{AB} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7) - \dot{E}_{CA} (\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9); \\ \dot{I}_B = \dot{E}_{BC} (\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8) - \dot{E}_{AB} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7); \\ \dot{I}_C = \dot{E}_{CA} (\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9) - \dot{E}_{BC} (\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8). \end{cases} \quad (1)$$

Комплексные проводимости каждой фазы эквивалентной нагрузки (см. рисунок 2) можно определить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{A \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_A}{\dot{E}_A} = \frac{\dot{E}_{AB}(\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7) - \dot{E}_{CA}(\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9)}{\dot{E}_A}; \\ \dot{Y}_{B \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_B}{\dot{E}_B} = \frac{\dot{E}_{BC}(\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8) - \dot{E}_{AB}(\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7)}{\dot{E}_B}; \\ \dot{Y}_{C \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_C}{\dot{E}_C} = \frac{\dot{E}_{CA}(\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9) - \dot{E}_{BC}(\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8)}{\dot{E}_C}. \end{cases} \quad (2)$$

Выразим фазные и линейные ЭДС через ЭДС E_{AB} (примем, что вектор фазного напряжения E_A направлен по действительной оси комплексной плоскости), после подстановки в систему (2) получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{A \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_A}{\dot{E}_A} = \frac{\dot{E}_{AB}(\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7) - \dot{E}_{CA}(\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9)}{\dot{E}_A}; \\ \dot{Y}_{B \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_B}{\dot{E}_B} = \frac{\dot{E}_{BC}(\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8) - \dot{E}_{AB}(\dot{Y}_4 + \dot{Y}_7)}{\dot{E}_B}; \\ \dot{Y}_{C \text{ экв}} = \frac{\dot{i}_C}{\dot{E}_C} = \frac{\dot{E}_{CA}(\dot{Y}_6 + \dot{Y}_9) - \dot{E}_{BC}(\dot{Y}_5 + \dot{Y}_8)}{\dot{E}_C}, \end{cases} \quad (3)$$

где a – комплексный оператор ($a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$).

После нескольких преобразований с учетом принятого допущения об отсутствии активных составляющих токов ветвей КУ ($g_7 = 0, g_8 = 0, g_9 = 0$) можно записать:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{A \text{ экв}} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_4 + g_6) - b_4 + b_6 - b_7 + b_9) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(g_4 - g_6 + \sqrt{3}(b_4 + b_6 + b_7 + b_9)); \\ \dot{Y}_{B \text{ экв}} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_5 + g_4) - b_5 + b_4 - b_8 + b_7) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(g_5 - g_4 + \sqrt{3}(b_5 + b_4 + b_8 + b_7)); \\ \dot{Y}_{C \text{ экв}} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_6 + g_5) - b_6 + b_5 - b_9 + b_8) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(g_6 - g_5 + \sqrt{3}(b_6 + b_5 + b_9 + b_8)), \end{cases} \quad (4)$$

где g_4, g_5, g_6 (b_4, b_5, b_6) – активные (реактивные) составляющие комплексных проводимостей ветвей нагрузки, См;

b_7, b_8, b_9 – реактивные составляющие комплексных проводимостей КУ, См.

Для доказательства теоремы необходимо, чтобы мнимые составляющие комплексных проводимостей фаз (4) были равны нулю, а действительные составляющие имели одинаковое значение, т. е. активная мощность должна быть равномерно распределена по трем фазам.

На рисунке 1 активная мощность, потребляемая трехфазной нагрузкой,

$$P_4 + P_5 + P_6 = E_{AB}^2 (g_4 + g_5 + g_6). \quad (5)$$

К каждой фазе нагрузки, соединенной звездой (см. рисунок 2), приложено напряжение меньше в 1,73 раза, чтобы в этом случае трехфазная нагрузка потребляла такую же активную мощность, проводимости фаз должны быть увеличены в три раза. При равномерном распределении активной мощности по трем фазам (см. рисунок 2) действительные составляющие проводимости каждой фазы должны быть равны $g_4 + g_5 + g_6$.

В результате получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_4 + g_6) - b_4 + b_6 - b_7 + b_9) = g_4 + g_5 + g_6; \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_5 + g_4) - b_5 + b_4 - b_8 + b_7) = g_4 + g_5 + g_6; \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3}(g_6 + g_5) - b_6 + b_5 - b_9 + b_8) = g_4 + g_5 + g_6; \\ g_4 - g_6 + \sqrt{3}(b_4 + b_6 + b_7 + b_9) = 0; \\ g_5 - g_4 + \sqrt{3}(b_5 + b_4 + b_8 + b_7) = 0; \\ g_6 - g_5 + \sqrt{3}(b_6 + b_5 + b_9 + b_8) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Выполним ряд математических преобразований и представим систему (6) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_7 \\ b_8 \\ b_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{3}g_4 + \frac{2\sqrt{3}}{3}g_5 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 + b_4 - b_6 \\ -\frac{\sqrt{3}}{3}g_4 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 + \frac{2\sqrt{3}}{3}g_6 - b_4 + b_5 \\ \frac{2\sqrt{3}}{3}g_4 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 - b_5 + b_6 \\ -\frac{\sqrt{3}}{3}g_4 + \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 - b_4 - b_6 \\ \frac{\sqrt{3}}{3}g_4 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 - b_4 - b_5 \\ \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 - b_5 - b_6 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Необходимо выяснить совместность системы (7), при этом используем теорему Кронекера – Капелли [13], которая доказывает, что система линейных алгебраических уравнений совместна, когда ранг ее основной матрицы (A) равен рангу ее расширенной матрицы (T), при этом данная система имеет единственное решение, если ранг равен числу неизвестных (b). Для системы уравнений (7) $A = T = b = 3$, поэтому система уравнений (7) разрешима и решение единственно [13].

С использованием теоремы о ранге матрицы можно исключить несколько уравнений из системы (7), так как убранные уравнения представляют линейную комбинацию оставшихся уравнений [13]. В системе уравнений (7) исключим первые три уравнения, полученная система будет эквивалентна исходной:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_7 \\ b_8 \\ b_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{3}g_4 + \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 - b_4 - b_6 \\ \frac{\sqrt{3}}{3}g_4 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 - b_4 - b_5 \\ \frac{\sqrt{3}}{3}g_5 - \frac{\sqrt{3}}{3}g_6 - b_5 - b_6 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В результате решения системы уравнений (8) определим значения мнимых составляющих комплексных проводимостей трех ветвей КУ:

$$b_7 = -\frac{\sqrt{3}}{3} g_5 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_6 - b_4; \quad (9)$$

$$b_8 = \frac{\sqrt{3}}{3} g_4 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_6 - b_5; \quad (10)$$

$$b_9 = -\frac{\sqrt{3}}{3} g_4 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_5 - b_6. \quad (11)$$

Подставим полученные выражения (9) – (11) в уравнения, определяющие комплексные проводимости эквивалентной трехфазной нагрузки (4), в результате получим:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{A \text{ экв}} = (g_4 + g_5 + g_6) + j0; \\ \dot{Y}_{B \text{ экв}} = (g_4 + g_5 + g_6) + j0; \\ \dot{Y}_{C \text{ экв}} = (g_4 + g_5 + g_6) + j0. \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, для любых значений комплексных проводимостей трехфазной нагрузки (см. рисунок 1) существуют реактивные проводимости трех ветвей КУ, для которых эквивалентная нагрузка будет симметричной и активной, теорема доказана.

В качестве примера практического использования теоремы и расчетных выражений (9) – (11) рассмотрим схему питания тяговой сети однофазного тока с помощью трехфазного трансформатора, приведенную на рисунке 3.

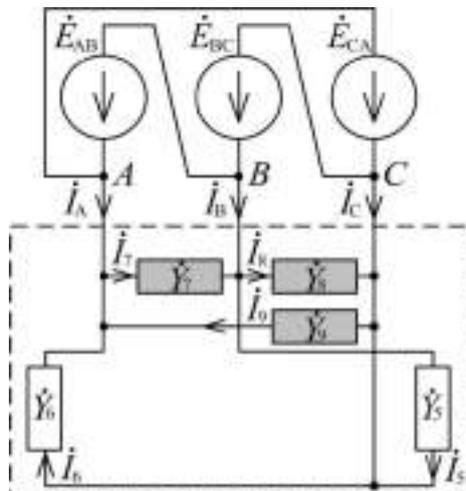


Рисунок 3 – Схема замещения вторичной обмотки трансформатора с тяговыми нагрузками и КУ

Две фазы вторичной обмотки трехфазного трансформатора будут подключены к фидерным зонам, а третья остается незагруженной, поэтому в выражениях (9) – (11) для определения проводимостей ветвей КУ действительная и мнимая составляющие комплексной проводимости одной ветви нагрузки (g_4 и b_4) будут равны нулю (см. рисунок 3), следовательно:

$$b_7 = -\frac{\sqrt{3}}{3} g_5 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_6; \quad (13)$$

$$b_8 = -\frac{\sqrt{3}}{3} g_6 - b_5; \quad (14)$$

$$b_9 = \frac{\sqrt{3}}{3} g_5 - b_6. \quad (15)$$

Как известно, токи фидерных зон могут значительно отличаться в зависимости от времени суток, массы и количества поездов на межподстанционной зоне [1, 2, 5]. В качестве примера примем, что токи фидерных зон имеют следующие значения: $I_5 = (410 - j \cdot 300)$ А и $I_6 = (300 - j \cdot 200)$ А, при этом проводимости ветвей будут такими: $Y_5 = (0,015 - j \cdot 0,011)$ См и $Y_6 = (0,011 - j \cdot 0,0073)$ См (см. рисунок 3), так как $E = 27,5$ кВ.

По выражениям (13) – (15) рассчитаем реактивные составляющие проводимостей ветвей КУ: $b_7 = -0,00231$ См, $b_8 = 0,00465$ См, $b_9 = 0,01596$ См, реактивные токи ветвей на рисунке 3 будут такими: $I_7 = 63,5$ А (индуктивный), $I_8 = 126,8$ А (емкостной), $I_9 = 436,7$ А (емкостной).

Для пояснения результатов расчетов построим векторные диаграммы ЭДС и токов для схемы на рисунке 3 с учетом выбранных направлений токов. Векторные диаграммы без КУ и с подключением КУ приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.

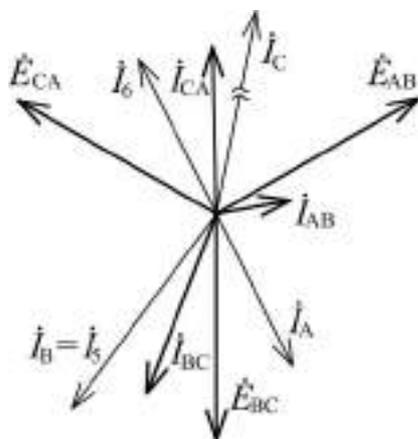


Рисунок 4 – Векторная диаграмма ЭДС и токов без подключения КУ

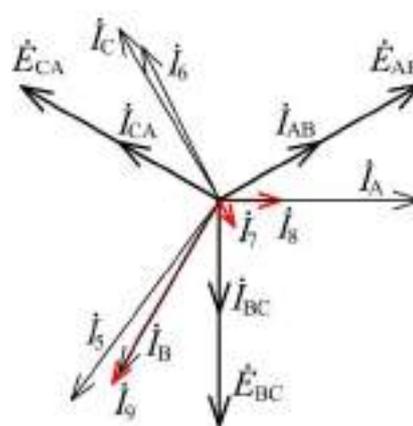


Рисунок 5 – Векторная диаграмма ЭДС и токов с подключением КУ

Как можно видеть на рисунке 5, протекание реактивных токов КУ позволяет обеспечить симметричную активную нагрузку тягового трансформатора, следовательно, уменьшить потери в тяговом трансформаторе и системе электроснабжения общего назначения.

С использованием уравнений (13) – (15) можно записать выражения, которые с учетом принятых допущений устанавливают связь между реактивными токами ветвей компенсирующего устройства и любыми значениями токов фидерных зон:

$$I_{r7} = -\frac{\sqrt{3}}{3} I_{a5} + \frac{\sqrt{3}}{3} I_{a6}; \quad (16)$$

$$I_{r8} = -\frac{\sqrt{3}}{3} I_{a6} - I_{r5}; \quad (17)$$

$$I_{r9} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_{a5} - I_{r6}, \quad (18)$$

где I_{a5}, I_{a6} (I_{r5}, I_{r6}) – активные (реактивные) составляющие токов тяговой нагрузки, А.

Эти выражения могут быть использованы при реализации системы автоматического регулирования реактивных токов КУ на тяговой подстанции. Токи, рассчитанные по выражениям (16) – (18), могут быть с положительным или отрицательным знаком, при этом ток

с отрицательным знаком указывает на индуктивный характер, с положительным – на емкостной.

Одним из технических параметров КУ с плавным регулированием реактивной мощности является диапазон регулирования реактивных токов. С учетом того, что тяговая нагрузка фидерных зон изменяется во времени случайным образом, необходимые диапазоны регулирования токов КУ можно определить с использованием метода статистических испытаний. Для этого нужно задать вероятностные законы изменения активных и реактивных составляющих токов двух фидерных зон тяговой подстанции, которые могут быть получены экспериментально или расчетным путем [5, 14]. В качестве примера примем, что составляющие тока каждой фидерной зоны описываются двухмерным нормальным законом распределения. Параметры законов распределения активного и реактивного тока фидерных зон приведены в таблице.

Принятые при расчете параметры законов распределения активной и реактивной составляющих токов фидерных зон тяговой подстанции переменного тока

| Номер ветви на рисунке 3 | Математическое ожидание составляющих тока, А | | Среднеквадратичное отклонение составляющих тока, А | | Коэффициент корреляции |
|--------------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|------------------------|
| | активная (I_a) | индуктивная (I_r) | активная (I_a) | индуктивная (I_r) | |
| 5 | 300 | 230 | 40 | 30 | 0,8 |
| 6 | 250 | 200 | 50 | 30 | 0,7 |

В результате моделирования с заданными параметрами вероятностных законов распределения (см. таблицу) были получены диапазоны регулирования реактивных токов трех ветвей КУ, при которых эквивалентная нагрузка, состоящая из тяговых нагрузок фидерных зон и КУ, будет симметричной и активной: ток ветви 7 (см. рисунок 3) должен быть индуктивным и изменяться в диапазоне от 5 до 54 А; ток ветви 8 должен быть емкостным и изменяться в диапазоне от 17 до 168 А; ток ветви 9 должен быть емкостным и изменяться в диапазоне от 165 до 595 А.

Необходимо отметить, что вероятностные законы изменения токов фидерных зон зависят от профиля пути, схемы питания контактной сети, графиков движения поездов, их массы и др., поэтому для определения диапазонов регулирования токов КУ наиболее целесообразно использовать вероятностные законы изменения тяговых токов, полученные на основании экспериментальных данных.

Для создания необходимых реактивных токов между фазами вторичной обмотки тягового трансформатора необходимо КУ с возможностью регулирования тока каждой ветви. В настоящее время известны различные схемы, позволяющие реализовать такие КУ:

1) схемы с использованием автотрансформаторов для плавного регулирования напряжения на батареях статических конденсаторов [5];

2) схемы с реактивными элементами и искусственной коммутацией тиристоров, регулирование реактивного тока осуществляется за счет фазового управления тиристорными ключами [5, 15];

3) схемы с использованием полупроводниковых преобразователей, реализованных на базе полностью управляемых электронных ключей. В настоящее время разработано большое количество таких КУ, например, устройство с использованием непосредственного преобразователя частоты [15] или схемы КУ на базе автономных инверторов для систем общего назначения и систем тягового электроснабжения переменного тока [16 – 20].

В результате можно сделать следующие выводы.

1. Предложена и доказана теорема, которая позволяет определить необходимые проводимости и реактивные токи трех ветвей КУ с несимметричной структурой, подключаемого к вторичной обмотке тягового трансформатора, при этом эквивалентная проводимость КУ и тяговой нагрузки будет симметричной и активной.

2. Рассмотрен пример использования теоремы и расчетных выражений, в котором была задана тяговая нагрузка фидерных зон, определены проводимости и реактивные токи ветвей

КУ, а также построены векторные диаграммы поясняющие получение симметричной системы токов вторичной обмотки тягового трансформатора.

3. Приведены расчетные выражения, которые устанавливают связь между реактивными токами ветвей КУ и любыми значениями токов фидерных зон (для мгновенных схем), эти выражения могут быть использованы при реализации системы автоматического регулирования КУ.

4. Приведен пример определения необходимых диапазонов регулирования реактивных токов КУ по заданным вероятностным законам изменения токов фидерных зон с использованием метода статистических испытаний.

5. Предложенный подход может быть практически реализован с использованием КУ, работа которого основана на схемах полупроводниковых преобразователей, такие устройства позволяют плавно регулировать реактивные токи ветвей в широком диапазоне.

Список литературы

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Тамазов, А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками [Текст] / А. И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
3. Мамошин, Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока [Текст] / Р. Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
4. Черемисин, В. Т. Влияние симметрирования фаз ЛЭП, питающих тяговые подстанции, на условия сопряжения систем тягового и внешнего электроснабжения [Текст] / В. Т. Черемисин // Сборник статей по результатам выполнения программы фундаментальных и поисковых научно-исследовательских работ «Исследование процессов взаимодействия объектов железнодорожного транспорта с окружающей средой» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 1996. – С. 168 – 176.
5. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
6. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание [Текст] / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др. – М.: Интехэнерго-Издат, 2014. – 304 с.
7. Повышение эффективности систем тягового электроснабжения переменного и постоянного тока и сокращение потерь электрической энергии в них: Научная монография [Текст] / В. Т. Черемисин, В. А. Квашук и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – 144 с.
8. Черемисин, В. Т. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования [Текст] / В. Т. Черемисин, А. В. Никонов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2018. – № 4. – С. 30 – 34.
9. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст] / Ю. М. Кулинич / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2001. – 153 с.
10. Кондратьев, Ю. В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности [Текст] / Ю. В. Кондратьев, А. В. Тарасенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2(22). – С. 79 – 87.
11. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. Electrical Railway Transportation Systems. Hoboken, New Jersey: IEEE Press Wiley, 2018, 591 p.
12. Li Q. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways, *Journal of Modern Transportation*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 1 – 11.
13. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
14. Тимофеев, Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками [Текст] / Д. В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.

15. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Б. И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
16. Lao K., Wong M., Dai N., Wong C., Lam C. A systematic approach to hybrid railway power conditioner design with harmonic compensation for high-speed railway, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 930 – 942.
17. Hu S., Xie B., Li Y., Gao X., Zhang Z., Luo L., Krause O., Cao Y. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1167 – 1177.
18. Электрические и электронные аппараты. Силовые и электронные аппараты [Текст] / Ю. К. Розанов, Е. Г. Акимов и др. – М.: Академия, 2010. – Т. 2. – 320 с.
19. Tan P., Morrison R., Holmes D. Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in A 25 kV Electrified Railway System Using A Shunt Active Filter Based On Voltage Detection, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 2, pp. 575 – 581.
20. Dixon J., Morán L. A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier, Using Multistage Converters for Subway Applications, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, no. 3, pp. 653 – 661.

Referenses

1. Markvardt K. G. *Ehlektronsnabzhenie ehlektroficyrovannykh zheleznnykh dorog* (Electricity supply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
2. Tamazov A. I. *Nesimmetriya tokov i napryazhenij vzyvaemaya odnofaznymi tyagovymi nagruzkami* (Current and voltage asymmetry caused by single-phase traction loads). Moscow: Transport, 1965, 235 p.
3. Mamoshin R. R. *Povyshenie kachestva ehnergii na tyagovykh podstanciyah dorog peremennogo toka* (Improvement of energy quality at traction substations of AC railways). Moscow: Transport, 1973, 224 p.
4. Cheremisin V. T. The effect of balancing the phases of power lines supplying traction substations, the conditions of coupling systems of traction and external electric supply [Vliyanie simmetrirovaniya faz LEHP, pitayushchih tyagovye podstancii, na usloviya sopryazheniya sistem tyagovogo i vneshnego ehlektronsnabzheniya]. *Tezisy dokladov konferentsii «Issledovanie processov vzaimodejstviya ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta s okruzhayushchej sredoj»* (Abstracts of the conference «Research of processes of interaction of objects of railway transport with environment»). – Omsk, 1996, pp. 168 – 176.
5. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Kondensatornye ustanovki ehlektroficyrovannykh zheleznnykh dorog* (Condenser installations of electrified railways). Moscow: Transport, 1983, 183 p.
6. Gapanovich V. A. *Jenergoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* (Energy savings in rail transport). Moscow, Intehjenergo-Izdat, 2014, 304 p.
7. Cheremisin V. T., Kvashchuk V. A., Kondrat'ev Yu. V., Salita E. Yu., Komyakova T. V., Kovaleva T. V. *Povyshenie ehffektivnosti sistem tyagovogo ehlektronsnabzheniya peremennogo i postoyannogo toka i sokrashchenie poter' ehlektricheskoy ehnergii v nih* (Improving the efficiency of AC and DC traction power supply systems and reducing the loss of electrical energy in them). Omsk: Omsk State Transport University, 2014, 144 p.
8. Cheremisin V. T., Nikonov A. V. Comparing the energy performance of regulated devices reactive power compensation which located at the middle between traction substations [Sravnenie ehnergeticheskikh pokazatelej reguliruemykh ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti v usloviyah ehkspluatatsii na postah sekcionirovaniya]. *Transport of the Urals*, 2018, no. 4, pp. 30 – 34.
9. Kulnich Yu. M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gibridnogo kompensatora reaktivnoj moshchnosti ehlektrovoza s plynnyim regulirovaniem napryazheniya* (Adaptive au-

automatic control system of hybrid electric locomotive reactive power compensator with smooth voltage regulation). Khabarovsk: Far Eastern State Transport University, 2001, 153 p.

10. Kondrat'ev Yu. V., Tarasenko A. V. Selection of power and placement of devices for transverse reactive power compensation [Vybor moshchnosti i mesta razmeshcheniya ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti]. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2(22), pp. 79 – 87.

11. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. *Electrical Railway Transportation Systems*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press Wiley, 2018, 591 p.

12. Li Q. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways, *Journal of Modern Transportation*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 1 – 11.

13. Bronshtejn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov*. (Handbook of mathematics for engineers and pupils of technical colleges). Moscow: Publishing House «Science», 1980, 976 p.

14. Timofeev D. V. *Rezhimy v ehlektricheskikh sistemah s tyagovymi nagruzkami* (Modes in electrical systems with traction loads). Moscow: Energy, 1972, 296 p.

15. Kudrin B. I. *Ehlektronsnabzhenie promyshlennykh predpriyatij*. (Power supply of industrial enterprises). Moscow: «Internet Engineering», 2006, 672 p.

16. Lao K., Wong M., Dai N., Wong C., Lam C. A systematic approach to hybrid railway power conditioner design with harmonic compensation for high-speed railway, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 930 – 942.

17. Hu S., Xie B., Li Y., Gao X., Zhang Z., Luo L., Krause O., Cao Y. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1167 – 1177.

18. Rozanov Yu. K., Akimov E. G. *Ehlektricheskie i ehlektronnye apparaty. Silovye i ehlektronnye apparaty*. (Electric and electronic apparatus. Power and electronic apparatus). Moscow: «Academy», Vol. 2, 2010, 320 p.

19. Tan P., Morrison R., Holmes D. Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in A 25 kV Electrified Railway System Using A Shunt Active Filter Based On Voltage Detection, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 2, pp. 575 – 581.

20. Dixon J., Morán L. A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier, Using Multistage Converters for Subway Applications, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, no. 3, pp. 653 – 661.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Москалев, Ю. В. Определение диапазонов регулирования токов компенсирующего устройства для снижения несимметрии тяговых нагрузок и повышения коэффициента мощности тяговой подстанции переменного тока железных дорог [Текст] / Ю. В. Москалев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 81 – 91.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moskalev Yuriy Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

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

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Moskalev Yr. V. Definition ranges of current regulation compensating device to reduce the unbalance of the traction loads and improve the power factor of the traction substation alternating current railways. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 81 – 91 (In Russian).

УДК 621.316.99:621.331

А. В. Уткина

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

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДРЕНАЖНАЯ ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

***Аннотация.** Статья посвящена вопросу защиты подземных металлических сооружений в зоне влияния блуждающих токов тяговой сети постоянного тока. В статье приведен алгоритм совместной работы дренажных установок для одновременной защиты заземляющего устройства тяговой подстанции и двух изолированных подземных проводников, расположенных в зоне влияния тяговой сети постоянного тока. Предложенный алгоритм работы совместной дренажной защиты подземных сооружений позволяет обеспечить возможность оптимальной защиты: одновременного поддержания защитного потенциала подземных сооружений при минимально необходимом дренажном токе, что позволяет сократить затраты на электроэнергию, уменьшить коррозионные разрушения и продлить срок службы подземных сооружений, тем самым повысить эффективность их эксплуатации.*

***Ключевые слова:** заземляющее устройство, тяговая рельсовая сеть, блуждающий ток, подземное сооружение, дренажная установка.*

Anastasia V. Utkina

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

AUTOMATED DRAINAGE PROTECTION OF BURIED STRUCTURES OF DC TRACTION NETWORK

***Abstract.** The paper deals with the protection of the buried structures under the influence of DC traction network stray currents. The paper presents an algorithm for joint operation of drainage units for simultaneous protection of the grounding grid and two isolated underground conductors with priority protection of the grounding grid. The proposed algorithm of joint drainage protection of buried structures allows providing the possibility of optimal protection: simultaneous keeping of the protective potential of buried structures with the minimum required drainage current, which allows reducing energy costs, reducing corrosion damage and extend the operating life of buried structures.*

***Keywords:** grounding grid, traction rail network, stray current, buried structure, drainage unit.*

Электрифицированный железнодорожный транспорт является мощным источником блуждающих токов в земле. Блуждающие токи оказывают разрушающее воздействие на подземные металлические сооружения, расположенные вблизи от железной дороги. Такому воздействию подвержены транспортные сооружения, такие как трубопроводы различного назначения, и металлические конструкции систем электроснабжения, такие как заземляющие устройства тяговых подстанций (ЗУ ТП), кабельные линии всех назначений и др. При этом наибольшую опасность представляют блуждающие токи, вызванные тяговой рельсовой сетью постоянного тока.

Критерием разрушающего воздействия блуждающих токов является значение потенциала подземного сооружения, измеренного относительно медно-сульфатного электрода сравнения (МСЭ), расположенного на уровне сооружения и на расстоянии 0,1 м от его боковой поверхности [1]. Согласно ГОСТу [1] значение потенциала сооружения, при котором опасное влияние блуждающих токов минимально, должно находиться в диапазоне от минус 0,85 В до минус 2,5 В для изолированных сооружений и до минус 3,5 В для неизолированных сооружений. Значение потенциала сооружения, большее защитного диапазона, приводит к коррозионному процессу (зона недозащиты), значение потенциала сооружения, наоборот, меньшее защитного диапазона, – к наводораживанию (зона перезащиты) [2].

Заземляющее устройство тяговых подстанций выполняет важную функцию в системе электроснабжения железных дорог. Электробезопасность оборудования системы электро-

снабжения напрямую зависит от технического состояния ЗУ ТП. Коррозионное разрушение ЗУ ТП может привести к серьезным авариям и крупным экономическим потерям, вызванным отказом электротехнического оборудования тяговых подстанций, а также к человеческим жертвам. Поэтому сложно переоценить необходимость защиты ЗУ от разрушения блуждающими токами.

Для защиты подземных металлических сооружений от влияния блуждающих токов применяют дренажные установки (ДУ) [3, 4]. Наиболее эффективным способом защиты является автоматическая дренажная защита, позволяющая поддерживать потенциал сооружения в защитном диапазоне на весь период эксплуатации [5]. При этом регулирование потенциала подземного сооружения осуществляется за счет изменения тока, протекающего в подземном сооружении. На рисунке 1 приведен график зависимости потенциала подземного сооружения, измеренного относительно МСЭ (φ_c), от дренажного тока (I_d), построенный по формулам из работы [6]. График приведен для трубопровода, расположенного на расстоянии 50 м от тяговой рельсовой сети с сопротивлением изоляции 711 Ом·м и коэффициентом утечки токов, равным 0,118 1/км. Значение сопротивления изоляции трубопровода принято для полимерного покрытия на основе терморезистивных смол после 50 лет эксплуатации [7].

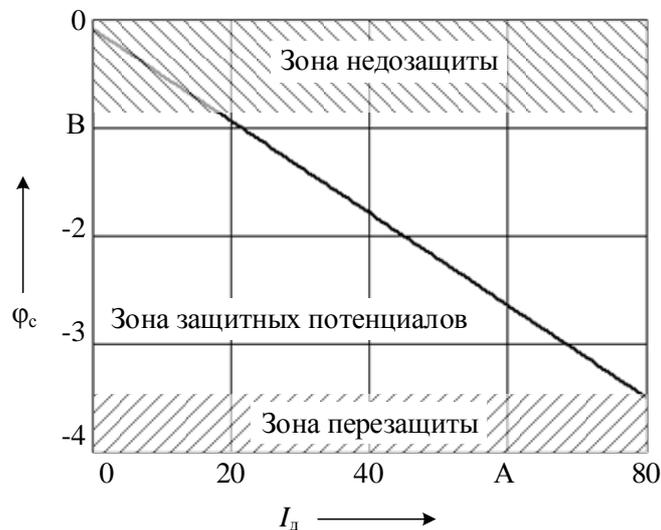


Рисунок 1 – График зависимости потенциала подземного сооружения, измеренного относительно МСЭ, от дренажного тока

На участках с низкой интенсивностью движения поездов, где малые токи утечки с тяговой рельсовой сети, для защиты подземных сооружений используют усиленные ДУ [8], имеющие дополнительный источник тока. Оптимальным средством защиты подземных сооружений является усиленная ДУ с накопителем энергии [9], позволяющая поддерживать защитный потенциал подземного сооружения за счет накопленной электрической энергии в период работы ДУ.

Поскольку вдоль железной дороги проложено не одно, а целая сеть подземных сооружений, то рассматривать распределение блуждающих токов в подземных сооружениях необходимо в системе. В статье [10] аналитически было показано, как распределяется блуждающий ток в системе трубопроводов при дренажной защите. На основании аналитического расчета [10], из которого видно, что блуждающий ток можно перераспределять между подземными сооружениями, был предложен способ автоматической совместной дренажной защиты подземных сооружений, суть которого состоит в централизованном управлении дренажными установками в зависимости от потенциального состояния подземных сооружений.

Рассмотрим систему, состоящую из ЗУ ТП и двух изолированных подземных проводников, расположенных в зоне влияния блуждающих токов тяговой сети постоянного тока,

имеющих дренажную защиту. Далее приведен алгоритм работы автоматической совместной дренажной защиты для рассматриваемого случая.

На рисунке 2 представлено основное тело алгоритма работы совместной защиты подземных сооружений. Исходными данными для работы алгоритма являются потенциалы ЗУ ($\varphi_{зу}$) и изолированных подземных проводников ($\varphi_{с1}$, $\varphi_{с2}$). По полученным значениям в первую очередь принимается решение в отношении ЗУ ТП. В случае, если потенциал ЗУ ТП находится в зоне защитных потенциалов, ветка алгоритма переходит к анализу потенциалов изолированных подземных проводников («Защита изолированных подземных проводников»). Если же потенциал $\varphi_{зу}$ оказывается в зоне недозащиты, то алгоритм переходит к «Устранению недозащиты ЗУ ТП», если потенциал $\varphi_{зу}$ оказывается в зоне перезащиты, – к «Устранению перезащиты ЗУ ТП». По окончании выполнения алгоритма заново производится измерение потенциалов подземных сооружений и анализ полученных результатов. Предложенный алгоритм реализован в системе автоматической совместной дренажной защиты подземных сооружений, по данному устройству была подготовлена заявка на изобретение 2018112932 РФ, МПК С23F 13/00 от 09.04.2018, по результату экспертизы которой принято решение о выдаче патента 26.03.2019. Система автоматической совместной защиты осуществляет контроль потенциалов с периодичностью в 1 с, что удовлетворяет требованиям стандарта [1].

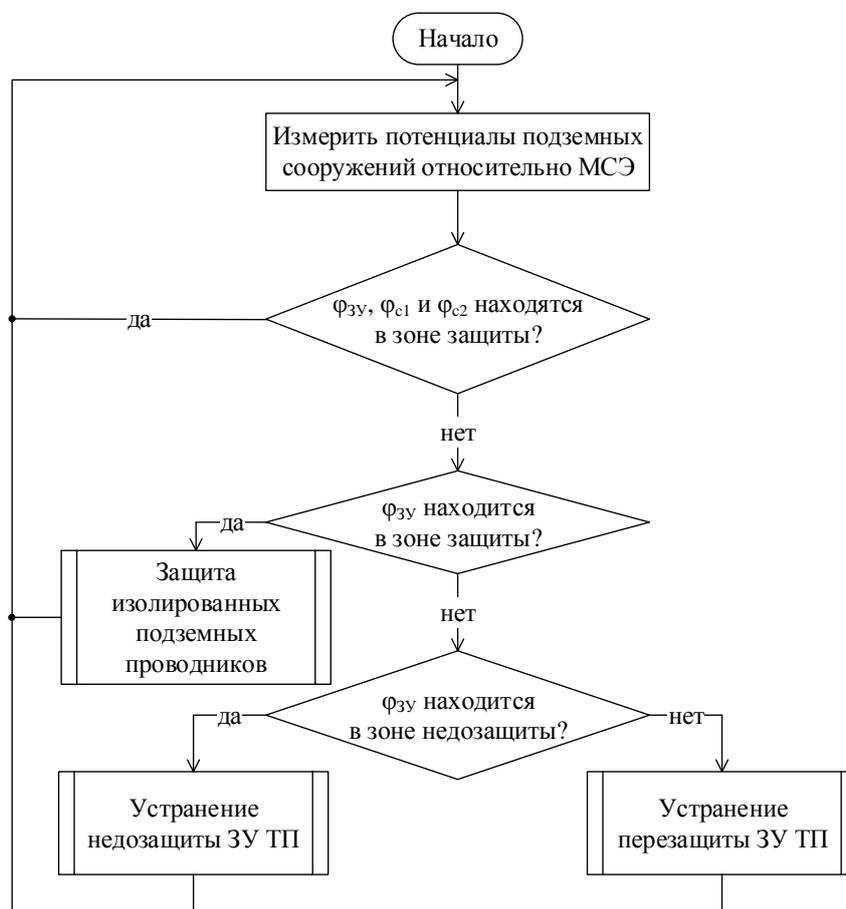


Рисунок 2 – Общий алгоритм работы совместной дренажной защиты подземных сооружений в поле действия блуждающих токов тяговой сети постоянного тока

На рисунке 3 приведен алгоритм управления дренажным током при устранении недозащиты ЗУ ТП. Зона недозащиты характеризуется значением потенциала больше минус 0,85 В вследствие недостаточной величины блуждающего тока, протекающего в подземном сооружении. Способом изменения потенциала подземного сооружения в отрицатель-

ную сторону является увеличение тока, протекающего в подземном сооружении за счет перераспределения тока среди соседних подземных сооружений, либо включение в систему усиленной ДУ в режиме дополнительного источника тока при недостаточном токе.

Если дренажная установка ЗУ ТП настроена на максимальный ток, но при этом $\varphi_{3У}$ больше минус 0,85 В, то отвод блуждающего тока на ЗУ ТП осуществляется за счет наиболее защищенного изолированного подземного проводника. У наиболее защищенного изолированного подземного проводника производится уменьшение дренажного тока. Таким образом, постепенно потенциал изолированного подземного проводника будет увеличиваться, а потенциал $\varphi_{3У}$ будет смещаться в сторону защитных потенциалов. Если же оба изолированных подземных проводника окажутся в зоне недозащиты (малая интенсивность движения поездов по участку), то в систему подключается усиленная ДУ в режиме дополнительного источника тока.

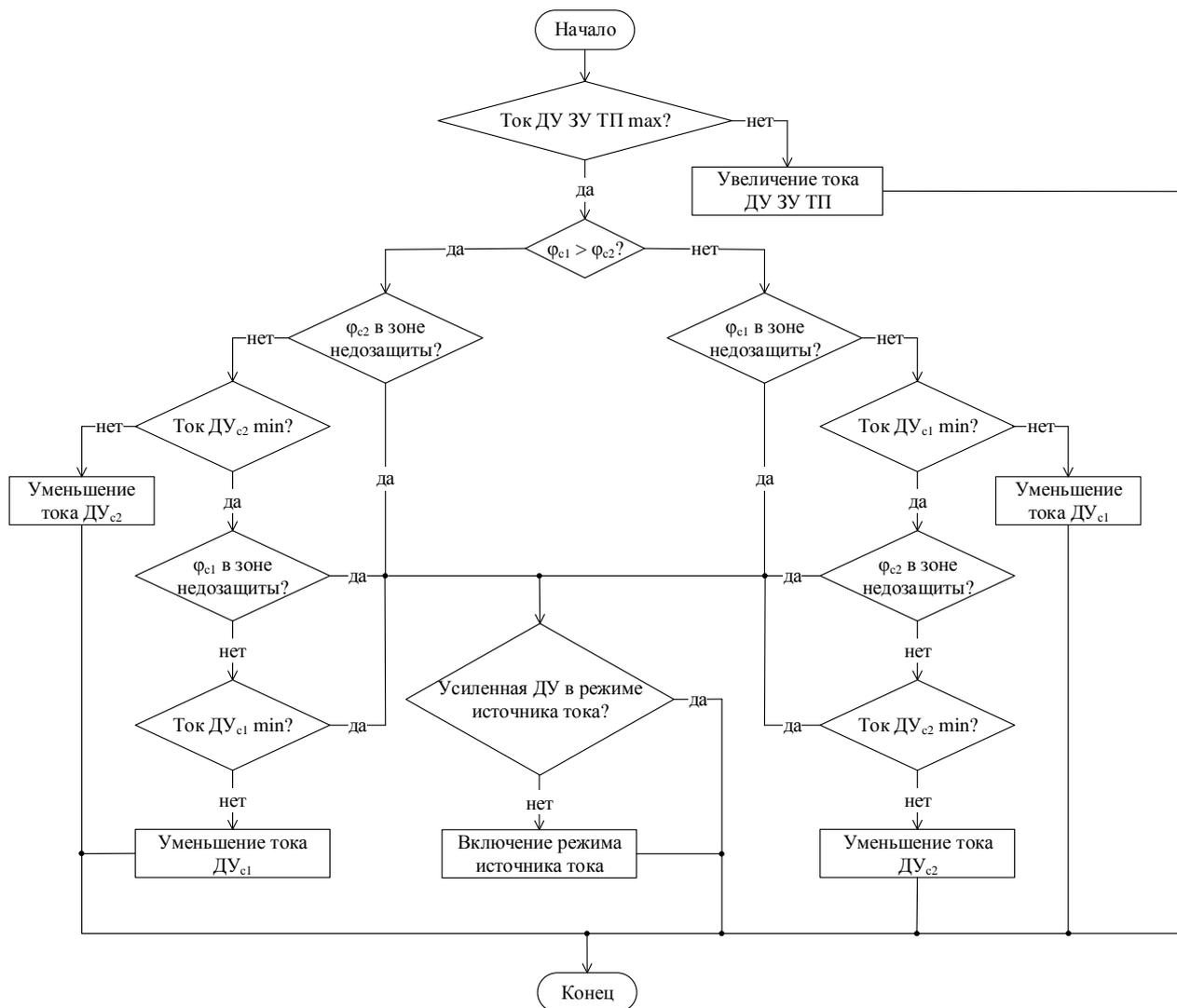


Рисунок 3 – Алгоритм управления дренажным током при устранении недозащиты ЗУ ТП

На рисунке 4 представлен алгоритм управления дренажным током при устранении перезащиты ЗУ ТП. При перезащите потенциал подземного сооружения оказывается меньше минус 3,5 В, т. е. величина тока, протекающего в подземном сооружении, слишком велика, чтобы обеспечить защиту. Способом устранения перезащиты подземного сооружения является отвод блуждающего тока от защищаемого сооружения на соседние, наименее защищенные подземные сооружения.

Сначала проверяется влияние на перезащиту усиленной ДУ. В случае, если уменьшение дренажного тока ЗУ ТП до минимума не дало результата и потенциал $\varphi_{3У}$ остался в зоне перезащиты, увеличивают ток ДУ у наименее защищенного изолированного подземного проводника.

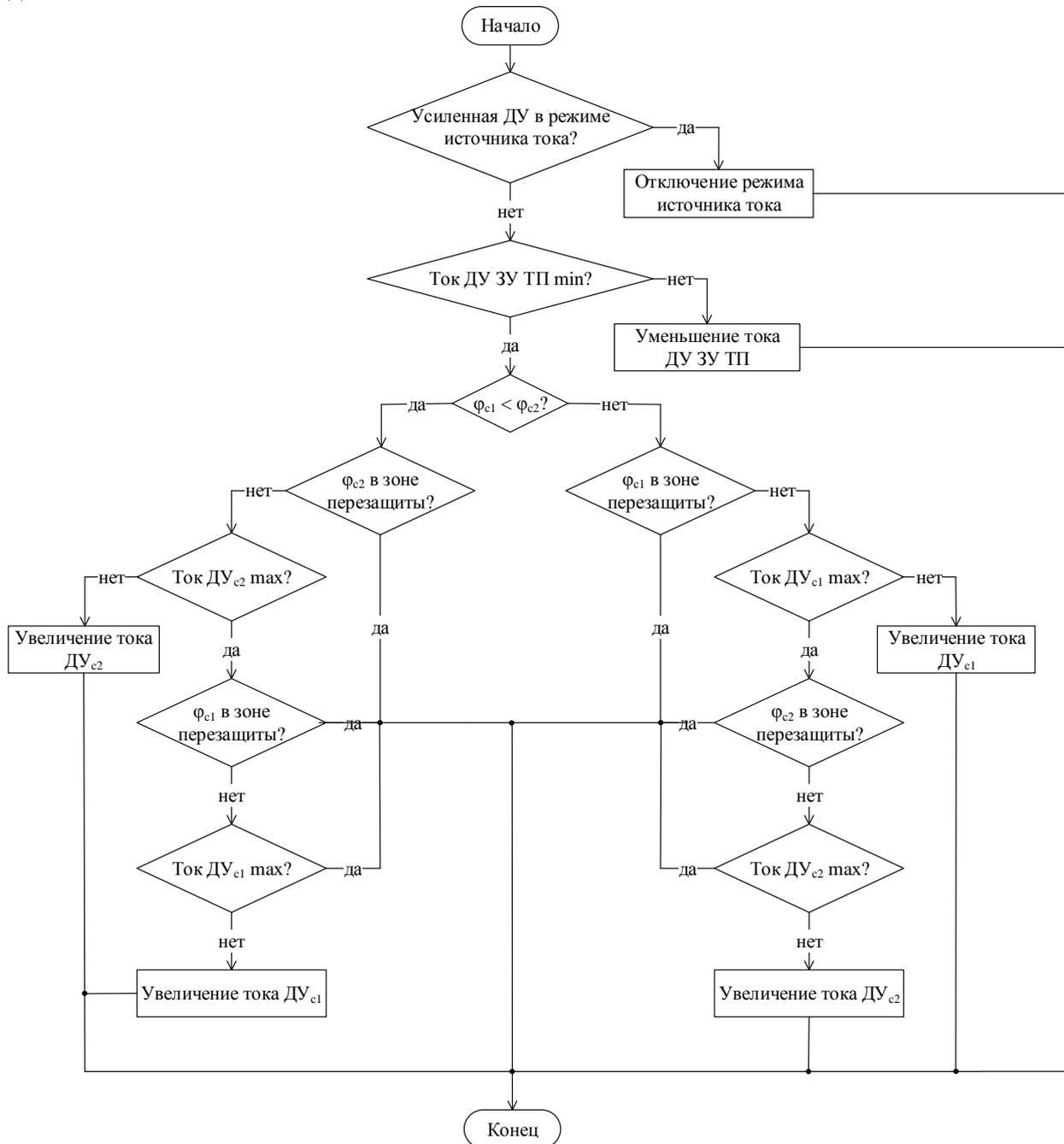


Рисунок 4 – Алгоритм управления дренажным током при устранении перезащиты ЗУ ТП

На рисунке 5 приведен алгоритм защиты изолированных подземных проводников в зоне влияния блуждающих токов тяговой сети постоянного тока. Данная ветка алгоритма используется в том случае, когда ЗУ ТП находится в зоне защитных потенциалов. Если оба изолированных подземных проводника находятся в зоне недозащиты, то алгоритм переходит к «Устранению недозащиты изолированных подземных проводников», если оба изолированных подземных проводника оказываются в зоне перезащиты, – на «Устранение перезащиты изолированных подземных проводников». В противном случае в зависимости от того, какой

из изолированных подземных проводников оказывается наименее защищенным, выбирается подпрограмма №1 или подпрограмма № 2.

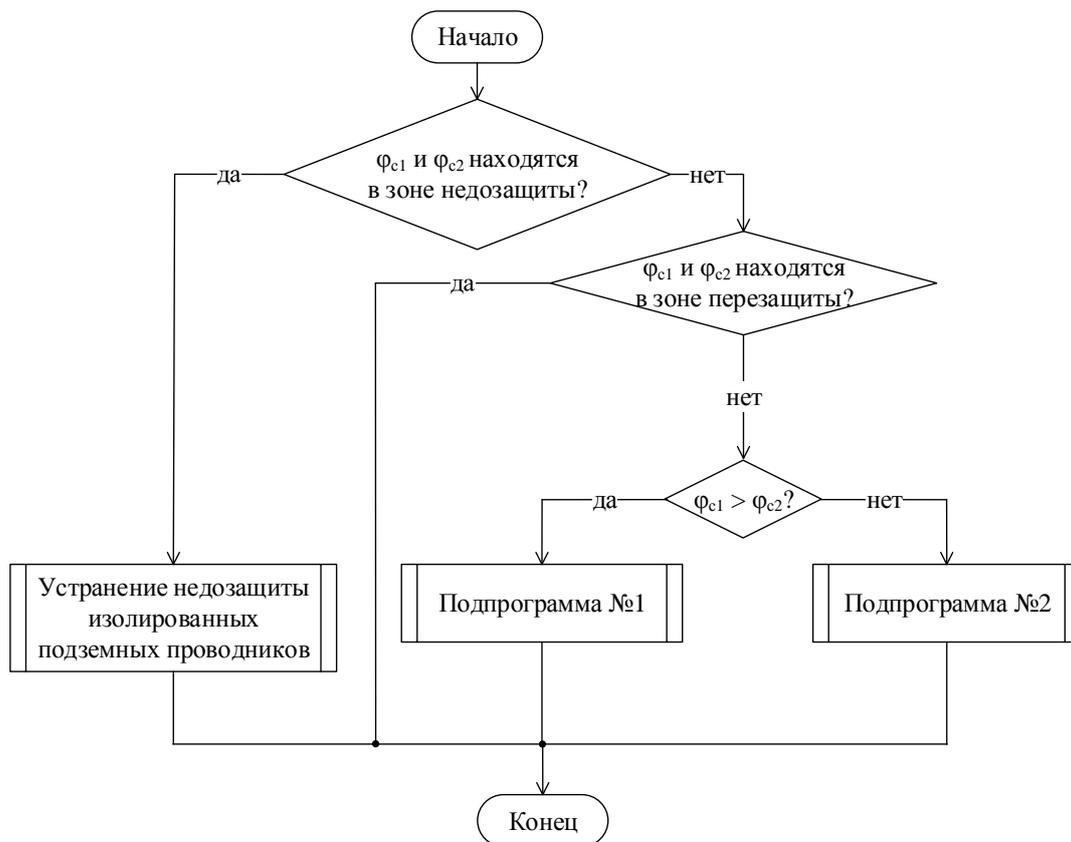


Рисунок 5 – Алгоритм защиты изолированных подземных проводников в зоне влияния блуждающих токов тяговой сети постоянного тока

Рассмотрим случай, когда φ_{c1} больше φ_{c2} (рисунок 6). Из него следуют три возможных варианта:

первый изолированный подземный проводник в зоне недозащиты, второй изолированный подземный проводник в зоне защитных потенциалов;

первый изолированный подземный проводник в зоне защитный потенциалов, второй изолированный подземный проводник в зоне перезащиты;

первый изолированный подземный проводник в зоне недозащиты, второй изолированный подземный проводник в зоне перезащиты.

Если первый изолированный подземный проводник оказывается в зоне недозащиты, то ток ДУ, подключенной к нему, увеличивают. Если с помощью подключенной ДУ не удастся устранить недозащиту, уменьшают ток ДУ у второго изолированного подземного проводника. Однако если при этом потенциал φ_{c1} остается в зоне недозащиты, то уменьшают дренажный ток ЗУ ТП либо переключают усиленный дренаж в режим дополнительного источника тока (рисунок 7). Если, напротив, первый изолированный подземный проводник оказывается в зоне защитных потенциалов, то перезащиту второго изолированного подземного проводника устраняют уменьшением тока ДУ второго изолированного подземного проводника либо увеличением тока ДУ, подключенной к первому изолированному подземному проводнику. Если с помощью указанных методов не удастся устранить перезащиту второго изолированного подземного проводника, то увеличивают дренажный ток ЗУ ТП.

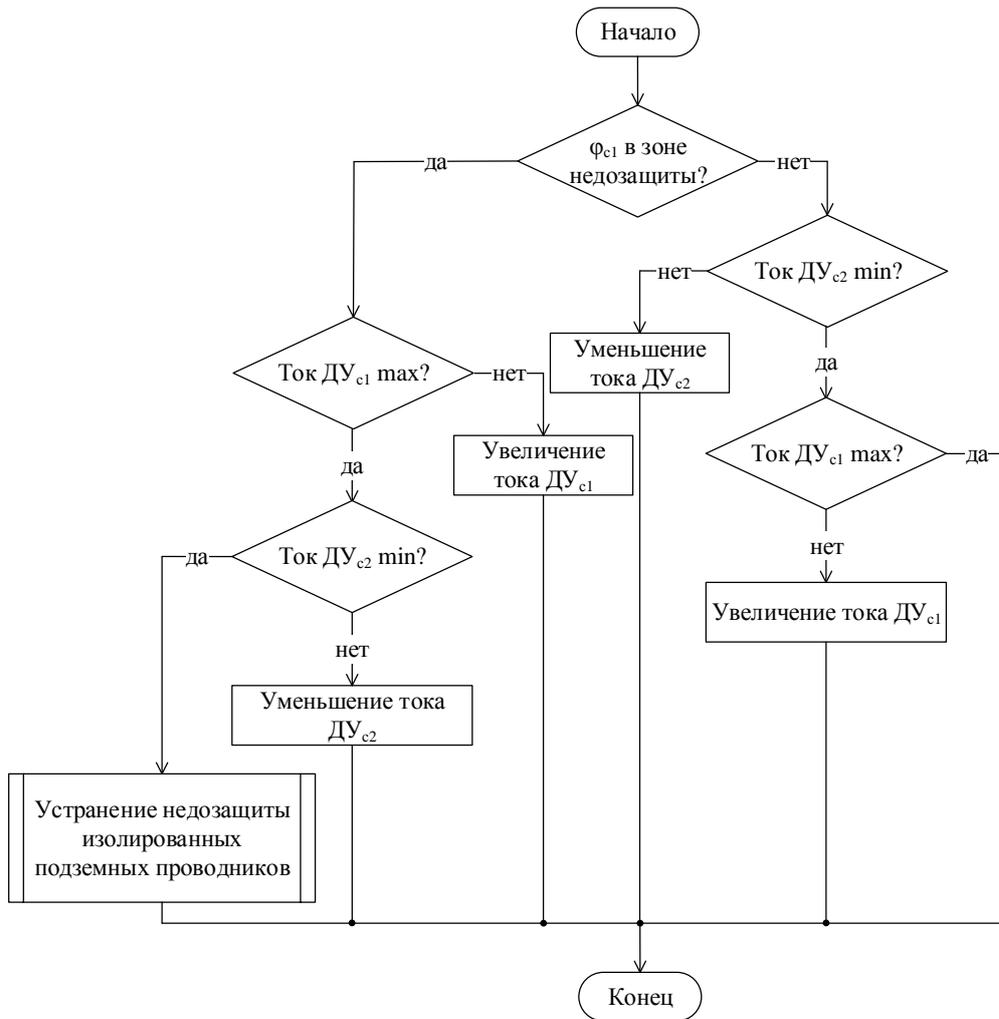


Рисунок 6 – Подпрограмма №1 управления дренажным током изолированных подземных проводников в зоне влияния тяговой сети постоянного тока

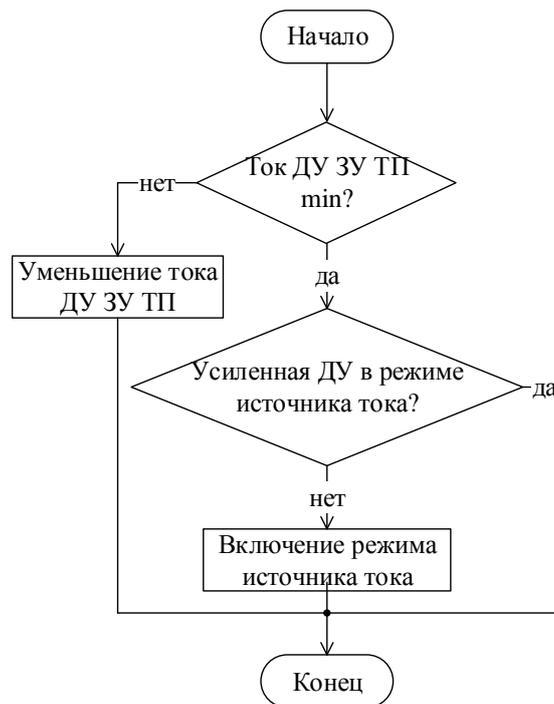


Рисунок 7 – Алгоритм «Устранение недозащиты изолированных подземных проводников»

В случае, когда φ_{c2} больше φ_{c1} (рисунок 8) возможны следующие варианты:
 первый изолированный подземный проводник в зоне перезащиты, второй изолированный подземный проводник в зоне защитный потенциалов;
 первый изолированный подземный проводник в зоне защитных потенциалов, второй изолированный подземный проводник в зоне недозащиты;
 первый изолированный подземный проводник в зоне перезащиты, второй изолированный подземный проводник в зоне недозащиты.

Если первый изолированный подземный проводник оказывается в зоне перезащиты, то уменьшают ток ДУ, подключенной к нему. Если уменьшение тока ДУ до минимума не позволяет устранить перезащиту, то увеличивают ток ДУ второго изолированного подземного проводника. Если первый изолированный подземный проводник оказывается в зоне защитных потенциалов, то недозащиту второго изолированного подземного проводника устраняют увеличением тока ДУ второго изолированного подземного проводника либо уменьшением тока ДУ, подключенной к первому изолированному подземному проводнику. Если при этом не удается устранить недозащиту второго изолированного подземного проводника, то переходят к «Устранению недозащиты изолированных подземных проводников».

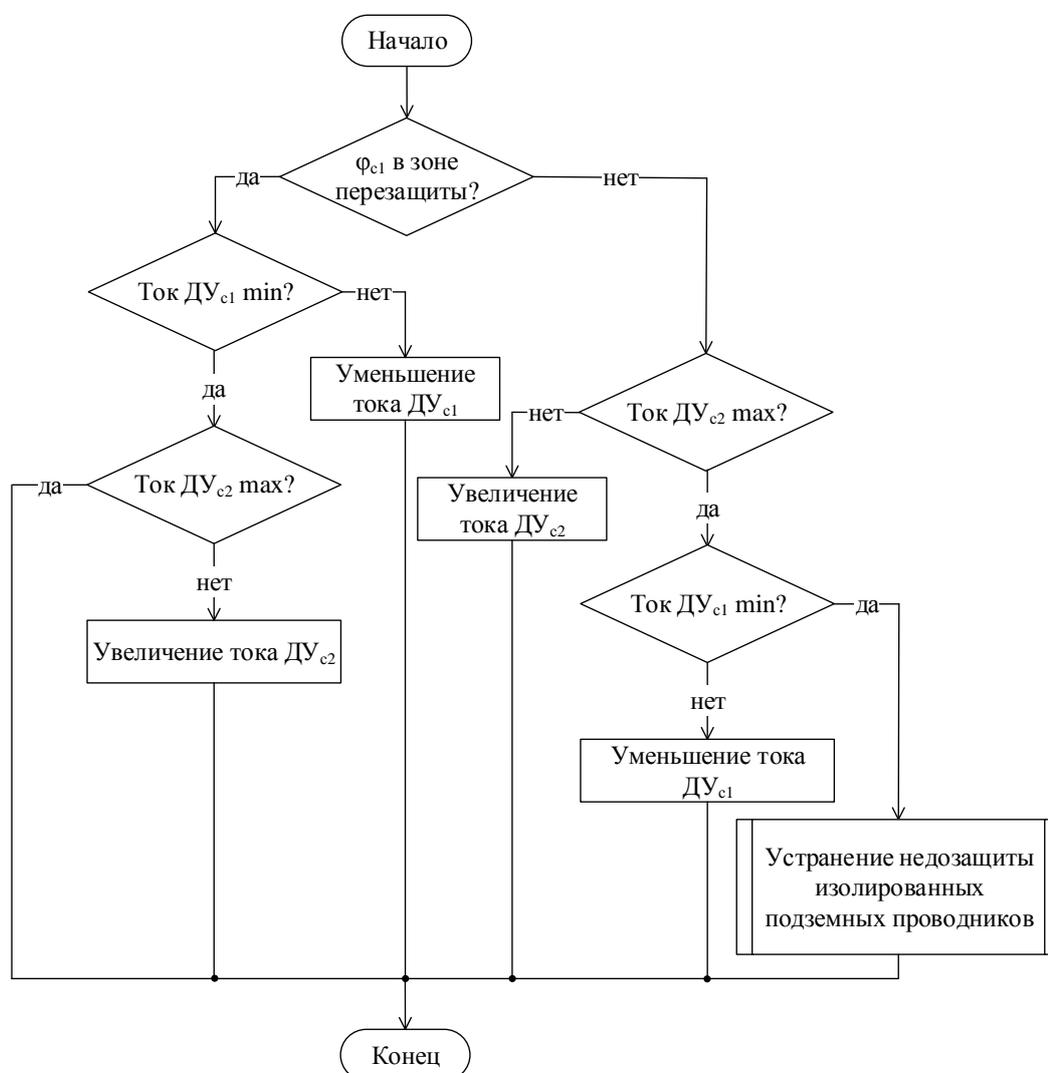


Рисунок 8 – Подпрограмма № 2 управления дренажным током изолированных подземных проводников в зоне влияния тяговой сети постоянного тока

Разработанный алгоритм работы совместной дренажной защиты подземных сооружений позволяет осуществить оптимальную защиту подземных сооружений за счет перераспределения блуждающих токов между ними. Зоны недозащиты устраняются за счет более защищенных подземных сооружений, а зоны перезащиты – за счет менее защищенных подземных сооружений. Разработанный алгоритм реализован в системе автоматической дренажной защиты, позволяющей повысить эффективность эксплуатации устройств электроснабжения тяговой сети за счет обеспечения одновременного поддержания защитного потенциала подземных сооружений при минимально необходимом дренажном токе.

Список литературы

1. ГОСТ 9.602 – 2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2016. – 87 с.
2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: Монография [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.
3. Красноярский, В. В. Подземная коррозия металлов и методы борьбы с ней [Текст] / В.В. Красноярский, А.К. Ларионов / Министерство коммун. хозяйства РСФСР. – М., 1962. – 216 с.
4. Пат. № 50541 Россия, МПК С23F 13/00. Блок дренажной защиты [Текст] / В. А. Кандаев, Н. Ю. Свешникова, А. В. Кандаев. – № 2005120126/22; заявл. 28.06.2005; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.
5. Пат. № 170510 Россия, МПК С23F 13/06. Автоматическая дренажная установка [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Уткина, А. А. Медведева. – № 2016131255; заявл.; 28.07.2016; опубл. 26.04.2017, Бюл. № 12.
6. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами [Текст] / И. В. Стрижевский / Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной литературы. – М., 1963. – 240 с.
7. СТО Газпром. 9.2-003-2009. Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений [Текст] / ОАО «Газпром». – М., 2009. – 43 с.
8. Пат. № 20759 Россия, МПК С23F 13/00. Автоматическая дренажная установка [Текст] / В. А. Кандаев, Н. Ю. Свешникова, А. В. Кандаев. – № 2001115297/20; заявл. 31.05.2001; опубл. 27.11.2001, Бюл. № 33.
9. Пат. № 2637447 Россия, МПК С23F 13/00. Автоматическая дренажная установка с накопителем энергии [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева. – № 2016131267; заявл. 28.07.2016; опубл. 04.12.2017, Бюл. № 34.
10. Авдеева, К. В. Распределение электрических величин в системе из двух подземных сооружений при дренажной защите от блуждающих токов электрифицированного железнодорожного транспорта [Текст] / К. В. Авдеева, А. В. Уткина // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2018. – № 1(69). – С. 111 – 119.

References

1. *Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii, GOST 9.602 – 2016* (Unified system of corrosion and ageing

protection. Underground constructions. General requirements for corrosion protection, State Standart 9.602 – 2016). Moscow, Standarty, 2016, 87 p.

2. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdayushchiye toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and corrosion monitoring of underground facilities of railway supply systems). Moscow: UMTS ZHDT RUSSIA, 2013, 552 p.

3. Krasnoyarskiy V. V., Larionov A. K. *Podzemnaya korroziya metallov i metody bor'by s ney* (Underground corrosion of metals and methods of corrosion protection). Moscow: Publishing house of the Ministry of public utilities of the RSFSR, 1962. 216 p.

4. Kandev V. A., Sveshnikova N.Yu., Kandev A. V. *Patent RU 50541 U1*, 20.01.2006.

5. Kandev V.A., Avdeeva K. V., Utkina A. V., Medvedeva A. A. *Patent RU 170510 U1*, 26.04.2017.

6. Strizhevskiy I. V. *Teoriya i raschet drenazhnoy i katodnoy zashchity magistral'nykh truboprovodov ot korrozii bluzhdayushchimi tokami* (Theory and design of drainage and cathode protection of pipelines from stray currents corrosion). Moscow: State scientific-technical publishing house of oil and mountain-fuel literature, 1963, 240 p.

7. *Zashchita ot korrozii. Proyektirovaniye elektrokhimicheskoy zashchity podzemnykh sooruzheniy, STO Gazprom 9.2-003-200* (Corrosion Protection. Design of electrochemical protection of underground structures. Gazprom organization standard 9.2-003-200). Moscow: JSC «Gazprom», 2009, 43 p.

8. Kandev V. A., Sveshnikova N. Yu., Kandev A. V. *Patent RU 20759 U1*, 27.11.2001.

9. Kandev V. A., Avdeeva K. V. *Patent RU 2637447 C1*, 04.12.2017.

10. Avdeeva K. V., Utkina A. V. Distribution of the electrical quantities in the system of the two underground constructions with a drainage protection against stray current from electrified rail transport [Raspredeleniye elektricheskikh velichin v sisteme iz dvukh podzemnykh sooruzheniy pri drenazhnoy zashchite ot bluzhdayushchikh tokov elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta]. *Vestnik RGUPS*. 2018, no. 1 (69), pp. 111 – 119.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Уткина Анастасия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел: 8-908-800-32-75.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Уткина, А. В. Автоматизированная дренажная защита подземных сооружений тяговой сети постоянного тока [Текст] / А. В. Уткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 92 – 101.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Utkina Anastasia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Telecommunication and radio systems and networks», OSTU.

Phone: 8-908-800-32-75.

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

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Utkina A. V. Automated drainage protection of buried structures of DC traction network. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 92 – 101 (In Russian).

УДК 621.315.175

В. С. Ратушняк, В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, О. Ю. Вахрушева

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

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА СРЕДСТВ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ НА ЛЭП

***Аннотация.** Проблема аварийных отключений энергопотребителей из-за обрыва проводов ЛЭП по причине гололедообразования остается актуальной. В качестве решения этой проблемы в статье предложено устройство электромеханического класса, разрабатываемое авторами. Изложены принципы его работы, особенности конструкции и размещения на проводах. Описана функциональность устройства в автоматическом режиме. Приведено обоснование наибольшей эффективности электромеханических методов борьбы с наледью в сравнении с другими, в том числе тепловыми методами. Обозначена необходимость поиска оптимальных параметров импульса и конструкции исполнительного механизма.*

***Ключевые слова:** обледенение ЛЭП, электромеханический способ, удаление льда, борьба с обледенением проводов, гололедно-изморозевые отложения.*

Valentina S. Ratushnyak, Viktor S. Ratushnyak, Evgeniy S. Ilin, Oksana Y. Vachrusheva

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

SOME ASPECTS OF CHOICE OF MEANS OF FIGHTING WITH THE ICE DEPOSIT ON THE POWER LINES

***Abstract.** The problem of emergency outages of power consumers due to the interruption of the wires of power lines due to ice formation remains relevant for today. As a solution to this problem, an electromechanical class device developed by the authors is proposed in the article. The principles of his work, the features of the design and placement on the wires are outlined. The functionality of the device in automatic mode is described. The substantiation of the maximum efficiency of electromechanical methods of struggle against icing is given in comparison with others, including thermal methods. It is necessary to search for optimal pulse parameters and the design of the actuator.*

***Keywords:** transmission line, ice shedding, iced cables, electro-impulse de-icing, ice failure*

В осенне-весенний сезон провода ЛЭП подвергаются опасности образования гололедных отложений. Это может приводить к обрывам проводов, разрушению опор и массовому отключению потребителей. В таких регионах, как Северо-Запад, Поволжье, Оренбуржье, Крым, Дальний Восток, располагаются территории, относящиеся к гололедоопасным районам III и более уровней, где из-за погодных условий может наблюдаться превышение нормативных гололедных нагрузок до 1 – 2 раз в сезон. Последние статистические данные, полученные из Министерства энергетики [1, 2], подтверждают высокую значимость этого природного фактора: так, количество аварийных отключений по причине гололедообразования в период осенне-зимнего периода (ОЗП) 2017 – 2018 гг. возросло на 87 % в сравнении с предыдущим ОЗП (503 аварийных отключения). При этом риск учащения случаев аварийных отключений энергопотребителей в период ОЗП возрастает в связи с увеличением протяженности ЛЭП за счет введения в эксплуатацию новых участков [3], в том числе в гололедоопасных районах.

Известно более 170 патентов российских и мировых изобретений, посвященных способам удаления наледи с проводов ЛЭП. Из них самые известные и получившие широкое распространение – это плавка гололеда постоянным регулируемым током [4] или током высокой частоты (метод основан на «скин-эффекте») [5 – 7]. Как и большинство других изобретений, эти методы относятся к тепловым согласно разработанной в последнее время [5] классификации. Плавка постоянным током реализуется управляемым выпрямителем для плавки гололеда (ВУПГ). В июне 2010 г. ВУПГ-14/1200 аттестован на соответствие требованиям ОАО

«ФСК ЕЭС». Устройство введено в эксплуатацию на ряде подстанций ОАО «Камчатскэнерго», «Татэнерго», «Кубаньэнерго», «Сахалинэнерго», «Волгоградэнерго».

Главным недостатком этого метода является необходимость отключения потребителей на время удаления наледи. Гололедоопасные погодные условия могут сохраняться на протяжении нескольких дней, а на освобождение проводов ото льда требуются десятки мегаватт. Ток плавки в 1,5 – 2 раза превышает длительно допустимый ток. Кроме того, ВУПГ-14/1200 – дорогая (порядка 100 млн руб.) и громоздкая (более 4 т) установка, при этом радиус ее действия составляет около 40 км от места установки. Тем не менее на сегодняшний день нагрев – основной способ профилактики и своевременного удаления наледи с ЛЭП.

Обзор [8] других известных прототипов и действующих устройств показал, что все они имеют один или несколько недостатков:

- высокая стоимость самого устройства, энергозатраты на работу устройства;
- необходимость активного участия персонала для транспортировки устройства к месту удаления наледи, его установки на провод и управления;
- необходимость отключения ЛЭП;
- повреждение провода ЛЭП вследствие работы устройства;
- низкая скорость удаления наледи;
- движущиеся части, снижающие надежность устройства.

Поэтому разработка устройства для удаления льда с проводов ЛЭП, лишённого перечисленных недостатков, в настоящее время является актуальной задачей.

По мнению авторов статьи, наиболее перспективным является электромеханический метод [9 – 13], свойства которого опробованы в таких устройствах, как EIDI [14] и УСГМ [15]. В основе электромеханического метода лежит закон Ампера. За счет взаимного отталкивания или притягивания обеспечивается встряхивание проводов, что приводит к удалению наледи. Прототипы EIDI и УСГМ эффективно справлялись с задачей удаления гололедных отложений только вблизи места их крепления на проводе, что связано, по мнению авторов статьи, с недостаточно оптимально подобранным соотношением параметров импульса, таких как время и сила, а также с недостаточно эффективным использованием возникающих эффектов для удаления льда с рабочей линии электропередачи из-за особенностей исполнительного механизма.

Конструкция электромеханического устройства. По классификации, приведенной в работе [5], разрабатываемое авторами статьи устройство можно отнести к комбинированным электромеханическим методам с автоматическим типом управления. Электроимпульсное устройство [16] размещается в цилиндрическом корпусе диаметром 100 мм и устанавливается между однофазными проводами с помощью изолирующих штанг, выполненных из полимерных материалов, обеспечивающих необходимую электрическую прочность (напряжение между однофазными проводами не превышает 100 В). Таким образом, длина устройства зависит от расстояния между фазными проводами и составляет 7 – 10 м. Концы устройства жестко крепятся на проводах, при этом в штангу монтируется амортизационная система – воздушный поршень, с одной стороны, такая система крепления обладает жесткостью к высоким скоростям перемещения, что необходимо для полной передачи механического воздействия, которое генерирует система индукторов, с другой стороны – обеспечивает гашение низкочастотных колебаний, вызываемых быстрым сбросом большой массы гололедных отложений или ветром. На один пролет (200 м) двухцепной ЛЭП требуется три устройства (рисунки 1), вес каждого из которых составляет порядка 10 кг. Таким образом, увеличение нагрузки на опоры ЛЭП от установленных электроимпульсных устройств составляет не более 6 % (в расчете на 200-метровый пролет двухцепной ЛЭП и провод марки АС120/19). В сравнении с увеличением в 1,5 раза нагрузки на опоры ЛЭП от образующейся наледи даже в I районе по гололеду нагрузка от электроимпульсных устройств, предотвращающих обледенение, является допустимой.

Устройство включает в себя модуль бесконтактного питания (МБП) от провода ЛЭП, блок накопления заряда (БНЗ), генератор импульсных импульсов (ГИТ) [17], электромеханический преобразователь (ЭМП) – спиральный индуктор, модуль управления (МУ) и модуль связи (МС). Все эти блоки (рисунок 2) монтируются внутри изолирующей штанги под металлическим экраном, обеспечивающим защиту от перенапряжений. МБП является трансформатором тока и преобразует ток, протекающий в проводе ЛЭП, в ток, необходимый для работы устройства. Длительность, мощность и сила механического импульса регулируются МУ, расположенным внутри цилиндрического корпуса.

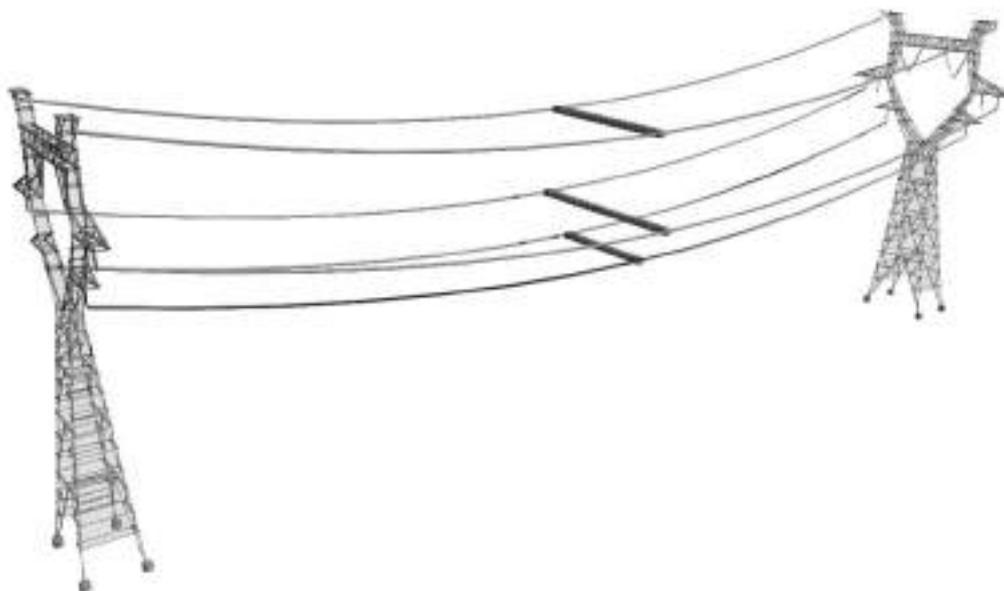


Рисунок 1 – Схема установки устройства на двухцепную ЛЭП

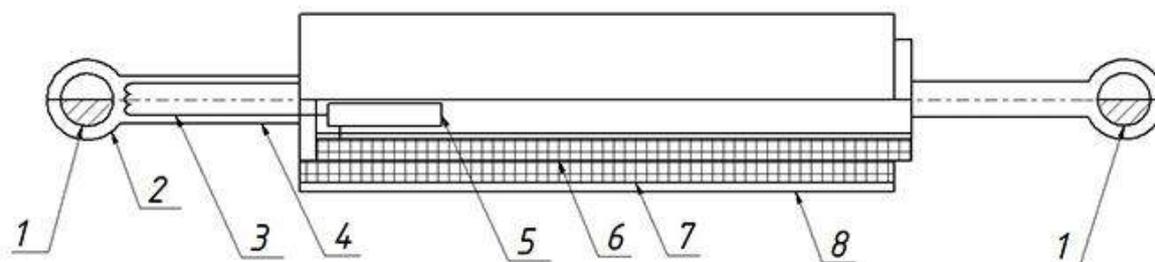


Рисунок 2 – Схематичное изображение основной части устройства для удаления наледи:
 1 – провод ЛЭП; 2 – система крепления с сердечником; 3 – катушка питающего трансформатора, подключенная к блоку накопления заряда и электрической схеме ГИТ;
 4 – изоляционная штанга с воздушным поршнем; 5 – система управления и связи;
 6, 7 – внутренний и внешний индукторы соответственно; 8 – корпус

Принципиальная схема устройства упрощенно может быть представлена в виде колебательного RLC-контура (рисунок 3). МБП и БНЗ на схеме представлены в виде источника ЭДС, МУ и ГИТ в виде конденсатора и коммутирующего устройства, ЭМП – в виде активного сопротивления.

Цикл работы устройства начинается с того, что МБП и БНЗ накапливают заряд в конденсаторе. После этого МУ и ГИТ производят разряд конденсатора на ЭМП. Электрический импульс вызывает механическое взаимодействие индукторов под действием силы Ампера. Индуктор закреплен в устройстве таким образом, что позволяет передавать образующийся механический импульс непосредственно двум проводам ЛЭП, к которым плотно прикреплены фиксирующие штанги, за счет отталкивания (сближения) этих проводов относительно друг друга.

В упрощенной электрической схеме эти процессы можно представить так: после полного заряда конденсатора происходит отключение цепи от внешнего источника питания и конденсатор разряжается на RL-контур, где в качестве активного сопротивления R выступает ЭМП.

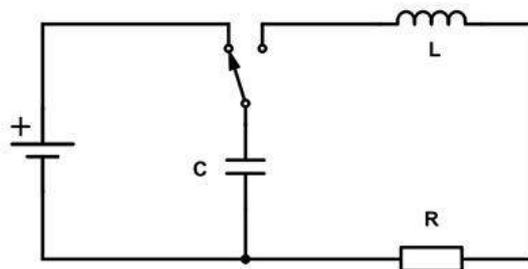


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства для удаления наледи с проводов ЛЭП

Как известно [18], реакция колебательного контура на разряд конденсатора при $R < R_{кр}$ описывается уравнениями вида (1) – (3), решением которых являются графики тока (рисунок 4) и напряжения (рисунок 5).

$$U_L = -U_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega' t + \theta); \quad (1)$$

$$U_C = -U_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega' t - \theta); \quad (2)$$

$$I = -\frac{U_0}{\omega' \cdot L} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega' t). \quad (3)$$

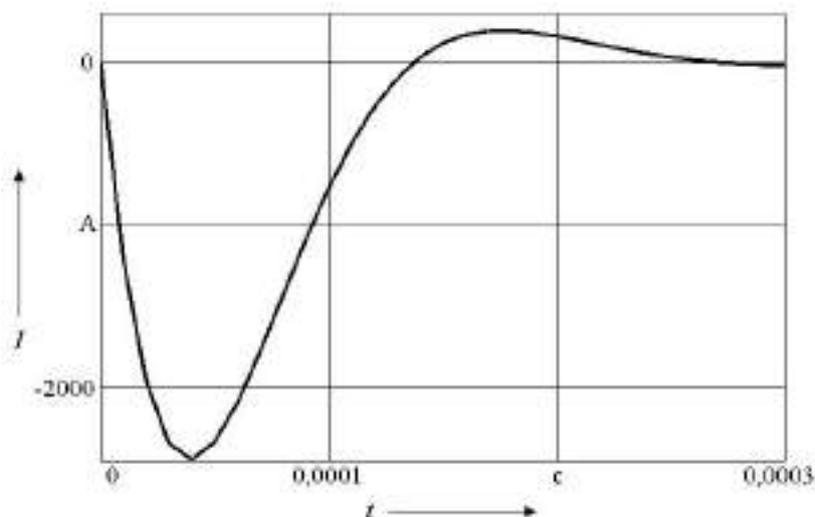


Рисунок 4 – График переходного процесса тока

С одной стороны, энергия, запасенная в конденсаторе, конечна и вычисляется по формуле

$$E = \frac{CU^2}{2}. \quad (4)$$

С другой стороны, энергия является определенным интегралом изменения мощности на катушке индуктивности и остается неизменной при уменьшении времени переходных процессов при разряде. Это приводит к увеличению мощности импульса, которое обусловлено большой величиной разрядного тока (5). Приведя параметры RLC-контура к таким значениям, при которых период колебаний становится минимальным, можно получить зна-

чительную мощность разряда при относительно небольшой величине запасенной энергии (рисунок 6):

$$P = I^2 R = \frac{E}{t}. \quad (5)$$

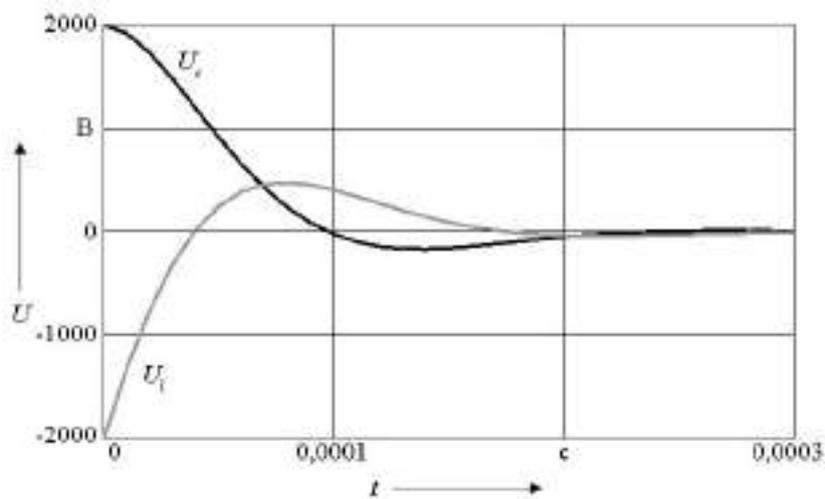


Рисунок 5 – График переходного процесса напряжения на катушке и конденсаторе

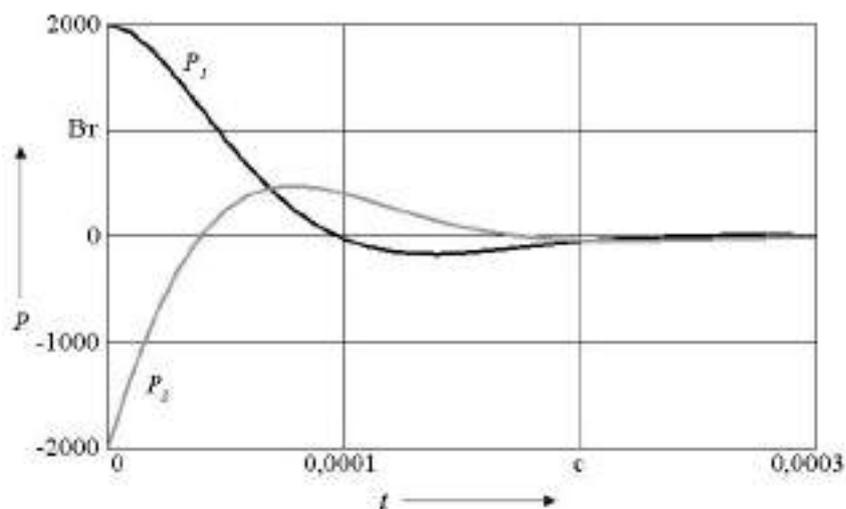


Рисунок 6 – Графики мощности импульсов с разными периодами колебаний

Чем выше быстродействие схемы, тем мощнее будет удар индуктора, а значит, устройство будет эффективнее стряхивать наледь.

В отличие от электромеханических устройств, основанных на принципе ударного электромагнитного молота, пиропатронах, сжатом воздухе [19] и т. п., применение электромагнитного индуктора не ограничивает быстродействие устройства такими физическими процессами, как время горения пороха или разгона и торможения ударных устройств. Поэтому в предлагаемом механизме время удара может быть на порядок меньше, чем в указанных электромеханических преобразователях, пиро- и газоразрядниках.

Так, энергия разрабатываемого авторами статьи устройства при параметрах электрической цепи $C = 85$ мкФ, $L = 13,7$ мкГн, $U_{\text{заряда}} = 2$ кВ равна 170 Дж. В этом случае время разряда занимает около 140 мкс. При этом выделившаяся мощность составляет около 1 МВт, 40 % которой может быть преобразовано в мощность механического удара. Известно, что 1 кг пироксилинового пороха имеет силу около 1 МДж [20] и время нарастания давления 1 – 3 мс [21]. То есть для получения эквивалентной мощности с помощью пиропатрона при КПД

пороха 40 % необходима энергия, равная 6000 Дж. Такая энергия выделяется при взрыве двух ружейных патронов 12 калибра.

Этот приблизительный расчет показывает, что хотя энергия, запасенная в цепи, на порядок ниже энергии, запасенной в двух ружейных патронах, короткий импульс в своем пике будет воздействовать на провод с усилением, которое создает одновременный взрыв количества пороха, запасенного в этих двух патронах. Именно это позволит сделать компактное подвесное устройство, по мощности импульса превосходящее все известные аналоги.

Исследования в области импульсного удаления наледи с проводов [22] позволяют сделать некоторые общие выводы: (1) значения адгезионной прочности, полученные при испытаниях на растяжение, по меньшей мере в 15 раз больше, чем при испытаниях на сдвиг льда на одной и той же основе; (2) адгезионная прочность на границе «лед – металл» больше, чем когезионная прочность льда, что противоречит положению полимерных материалов; (3) адгезионная прочность на границе «лед – металл», измеренная при высоких скоростях деформации, значительно меньше, чем при низких скоростях деформации; (4) лед ломается хрупко при высоких скоростях деформации и пластично при низких скоростях деформации, а переход от хрупкого к вязкому происходит на скорости деформации около 10^{-3} с^{-1} . В процессе механического удаления наледи ударными нагрузками предельная скорость деформации наледи составляет порядка 1 с^{-1} ; (5) адгезионная прочность на сдвиг по границе «лед – алюминий» и «лед – нержавеющая сталь» находится в пределах от 0,002 до 1,96 МПа; (6) чем выше ускорение, тем меньше смещение середины пролета по вертикали, поэтому важно создать высокоскоростное воздействие на провод; (7) чем меньше масса льда на единицу длины кабеля, тем тяжелее его удалить (требуются более высокие ускорения).

Приведенные в работе [22] уравнения критического ускорения для концентрического (6) и эксцентрического (7) льда, действующего на сегмент льда, позволяют определить требуемые параметры импульса:

$$a_{\text{critical}} = \frac{8[D_{\text{cable}}\tau_{\text{adhesive}} + (D - D_{\text{cable}})\tau_{\text{cohesive}}]}{\pi\rho(D^2 - D_{\text{cable}}^2)} \pm g; \quad (6)$$

$$a_{\text{critical}} = \frac{8[(\sqrt{D^2 - 4e^2} - D_{\text{cable}})\tau_{\text{cohesive}} + D_{\text{cable}}\tau_{\text{adhesive}}]}{\rho(2\pi D^2 - 2D^2 \arccos(\frac{2e}{D}) + 4e\sqrt{D^2 - 4e^2} - \pi D_{\text{cable}}^2)} - g, \quad (7)$$

где g – гравитация; e – эксцентрическое расстояние между центром профиля льда и центром кабеля; ρ – плотность льда; D_{cable} – диаметр кабеля; D – наружный диаметр профиля льда; τ_{adhesive} и τ_{cohesive} – адгезионные и когезионные силы наледи.

Автоматизация удаления и предупреждения наледообразования. Авторами предлагается использовать несколько режимов работы устройства, что создает возможность его функционирования в автономном режиме. В устройство с помощью датчиков предлагается добавить функцию контроля метеопараметров, необходимую для определения наступления критических погодных условий, при которых возможно образование наледи на проводах. При наступлении таких условий включается в работу функция предупреждения гололедообразования. Это необходимо для стряхивания капель и снега с проводов до образования ледяной муфты. Цикл работы включает в себя накопление энергии в течение 10 – 60 с и встряхивание проводов небольшой силой. В случае идентификации гололедной муфты включается функция удаления наледи. Цикл работы аналогичен предупреждению гололедообразования с разницей в силе прикладываемого механического импульса. Данный цикл повторяется до поступления сигнала с датчиков о не критичности погодных условий или до поступления сигнала с датчиков об отсутствии гололедной муфты. Функция удаленного мониторинга используется для контроля исправности устройства и получения информации о гололедной обстановке на объекте. Передача данных может быть организована по высокочастотному каналу передачи данных, 3G или другому актуальному каналу передачи данных.

Подводя итог сказанному, авторы заключают, что устройства электромеханического класса обеспечивают наилучшую эффективность борьбы с гололедообразованием на проводах. При этом параметры механического удара, исполнительного механизма, способ крепления в совокупности играют определяющую роль. Сила и время механического импульса определяют эффективность удаления наледи электромеханическим методом, которая обеспечивается достижением критического ускорения, преодолевающего адгезию льда к металлу с минимальной амплитудой колебаний провода (порядка микрометров). При этом важно передать энергию импульса на всю длину пролета.

Дальнейшая работа авторов направлена на создание модели взаимодействия устройства с проводом в системе конечных элементов для определения параметров механического импульса, необходимого и достаточного для удаления наледи на всей длине пролета ЛЭП, но не травмирующего сам провод.

Список литературы

1. Подготовка к осенне-зимнему периоду 2016 – 2017 гг., прохождение и основные итоги ОЗП 2015 – 2016 [Текст] / Министерство энергетики Российской Федерации. – М., 2016. – 216 с.
2. Подготовка и прохождение ОЗП 2017 – 2018 гг. [Электронный ресурс]: Всероссийское совещание об итогах прохождения ОЗП 2017 – 2018 гг. (27.04.2018, г. Москва) / Министерство энергетики Российской Федерации. – 2018. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/7822>
3. Инвестиционная деятельность [Электронный ресурс]: Годовой отчет 2016 / ПАО «ФСК ЕЭС». – 2016. – Режим доступа: http://report2016.fsk-ees.ru/strategic_report/investing_activities/
4. Пат. 2356148 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи [Текст] / Каганов В. И.; заявитель и патенто-обладатель Московский гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) (МИРЭА), Каганов Вильям Ильич. – № 2008119101/09; заявл. 15.05.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14.
5. Сухоруков, С. И. Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Сухоруков Сергей Иванович. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 220 с.
6. Лившиц, А. В. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты [Текст] / А. В. Лившиц, А. Я. Машович, Н. Г. Филиппенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2011. – № 2 (30). – С. 135 – 140.
7. Филиппенко, Н. Г. Разработка принципа измерения температуры обрабатываемого изделия в зоне ВЧ- и СВЧ-воздействия [Текст] / Н. Г. Филиппенко, Д. В. Буторин, А. В. Лившиц // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2017. – Т. 2. – С. 431 – 440.
8. Ратушняк, В. С. Обоснование необходимости разработки нового способа очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений [Текст] / В. С. Ратушняк // Труды межвуз. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» / Красноярский ин-т ж.-д. трансп. – филиал Иркутского гос. ун-та путей сообщения. – Красноярск, 2017. – С. 62 – 69.
9. Никитина, И. Э. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи [Текст] / И. Э. Никитина, Н. Х. Абдрахманов, С. А. Никитина // Нефтегазовое дело / Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т. – Уфа. – 2015. – № 3. – С. 794 – 823.
10. Аппаратный комплекс по удалению наледи с водостоков и карнизов зданий электроимпульсным способом [Текст] / Т. А. Сергиенко, Е. С. Ильин и др. // Труды межвуз. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» / Красно-

ярский ин-т ж.-д. трансп. – филиал Иркутского гос. ун-та путей сообщения. – Красноярск, 2015. – Т. 1. – С. 72 – 75.

11. Электрогидроимпульсный способ очистки сточных вод [Текст] / Е. С. Ильин, А. И. Орленко и др. // Экология производства // Отраслевые ведомости. – М. – 2017. – № 2. – С. 57 – 59.

12. Электроимпульсный способ утилизации железобетонных изделий [Текст] / Е. С. Ильин, А. И. Орленко и др. // Экология производства // Отраслевые ведомости. – М. – 2017. – № 11. – С. 60 – 63.

13. Вахрушева О. Ю. Об эксперименте применения магнитоимпульсного способа по очистке вагонов [Текст] / О. Ю. Вахрушева, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2018. – №1. – С. 117 – 122.

14. Egbert, R. I., Scharag R. L., Bernhart W. D., Zumwalt G. W., Kendrew T. J. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods, *IEEE Power & Energy Society*, 1989, no. 4(3). pp. 1855 – 1861.

15. Мобильная установка для плавки гололеда на проводах высоковольтных линий электропередачи 110 – 220 кВ и ее энергоэффективность [Текст] / Б. М. Антонов, Э. Х. Исакаев и др. // Энергия единой сети / Научно-технический центр федеральной сетевой компании единой энергетической системы. – М. – 2012. – № 5. – С. 26 – 31.

16. Пат. 2666754 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи [Текст] / Ратушняк В. С., Юрьев А. В., Ильин Е. С., Трухина И. С., Ратушняк В. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017136405; заявл.16.10.2017; опубл.12.09.2018, Бюл. № 26.

17. Пат. 2666225 С1 Российская Федерация, МПК Н 03 К 3/53. Генератор импульсных токов для высоковольтных электрогидравлических технологий [Текст] / Ратушняк В. С., Гаранин А. Е., Юрьев А. В., Ильин Е. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017123323; заявл. 03.07.2017; опубл. 06.09.2018, Бюл. № 25.

18. Теоретические основы электротехники: Учебник [Текст] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман и др. – СПб: Питер, 2003. – Т. 2. – 576 с.

19. Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks, *Springer*, 2008, 381 p.

20. Рогов, Н. Г. Физико-химические свойства порохов и твердых ракетных топлив: Учебное пособие [Текст] / Н. Г. Рогов, Ю. А. Груздев / Санкт-Петербургский гос. технол. ин-т (техн. ун-т). – СПб, 2005. – 200 с.

21. Пат. 2334278 С2 Российская Федерация, МПК G 08 В 17/06. Устройство для контроля и подрыва последовательных цепей пиропатронов [Текст] / Добролюбов В. А., Добролюбова С. В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева». – № 2006114250/09; заявл. 26.04.2006; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26.

22. Ji K., Rui X., Li L., Leblond A., McClure G. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces, *Computers & Structures*, 2015, no. 157, pp. 153 – 164.

References

1. *Podgotovka k osenne-zimnemu periodu 2016 – 2017, prohozhdenie i osnovnye itogi OZP 2015–2016* (Preparations for the autumn-winter period 2016 – 2017, the passage and the main results of the AWP 2015–2016). Moscow, 2016, 216 p.

2. *Podgotovka i prohozhdenie OZP 2017-2018 godov* (Preparation and completion of the AWP 2017-2018). <https://minenergo.gov.ru/node/7822>

3. *Investicionnaja dejatel'nost'* (Investment activities). http://report2016.fsk-ees.ru/strategic_report/investing_activities/

4. Kaganov V. I. *Patent RU 2356148 C1*, 20.05.2009.

5. Suhorukov S. I. *Avtomatizirovannaja sistema udalenija l'da s provodov LJeP* (Automated system for removing ice from power lines) Ph. D. thesis, Komsomol'sk-na-Amure, 2016. 220 p.
6. Livshits A. V., Mashovich A. YA., Filippenko N. G. The aspects of electrothermal processing of materials by electromagnetic field of high frequency [Aspekty ehlektrotermicheskoj obrabotki materialov ehlektromagnitnym polem vysokoj chastity]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – The journal of Modern technology. System analysis. Modeling*, 2011. no. 2 (30), pp. 135 – 140.
7. Filippenko N. G., Butorin D. V., Livshic A. V. Development of the principle of measuring the temperature of the processed product in the zone of HF and microwave exposure [Razrabotka principa izmereniya temperatury obrabatyvaemogo izdeliya v zone VCH- i SVCH-vozdjstvija] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* (Abstracts of the Int. scientific-practical conference «Transport infrastructure of the Siberian region»). Irkutsk, 2017, pp. 431 – 440.
8. Ratushnyak V. S. Justification of the need to develop a new method of cleaning the power lines from ice deposits [Obosnovanie neobходимosti razrabotki novogo sposoba ochistki provodov LJeP ot gololednyh otlozhenij]. *Trudy Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Innovacionnye tekhnologii na zhelezodorozhnom transporte»* (Works of the Int. scientific-practical conference «Innovative Technologies in Railway Transport»). Krasnojarsk, 2017, pp. 62 – 69.
9. Nikitina I. Je., Abdrahmanov N. H., Nikitina S. A. Ways to remove ice from power lines [Sposoby udalenija l'da s provodov linij jelektroperedachi]. *Neftegazovoe delo – The journal of Oil and gas business*, 2015, no. 3, pp. 794 – 823.
10. Sergienko T. A. Hardware complex for removing ice from drains and eaves of buildings in an electropulse way [Apparatnyj kompleks po udaleniyu naledi s vodostokov i karnizov zdaniy ehlektroimpul'snym sposobom]. *Trudy mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj (zaочноj) konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya zhelezodorozhnogo transporta»* (Works of the Int. scientific and practical (extramural) conference «Problems and Prospects for the Development of Railway Transport»). Krasnojarsk, 2015, pp. 72 – 75.
11. Il'in E. S., Orlenko A. I., Ratushnyak V. S., Truhina I. S., YUr'ev A. V. Electrohydropulse wastewater treatment method [EHlektrogidroimpul'snyj sposob ochistki stochnyh vod]. *EHkologiya proizvodstva – The journal of Production ecology*, 2017, no. 2, pp. 57 – 59.
12. Il'in E. S., Orlenko A. I., Ratushnyak V. S., Truhina I. S., YUr'ev A. V. Electric pulse method of recycling concrete products [EHlektroimpul'snyj sposob utilizacii zhelezobetonnyh izdelij]. *EHkologiya proizvodstva – The journal of Production ecology*, 2017, no. 11, pp. 60 – 63
13. Vahrusheva O. Ju., Il'in E. S., Ratushnyak V. S. Ob jeksperimente primenenija magnitoimpul'snogo sposoba po ochistke vagonov [On the experiment of using the magnetic pulse method for cleaning cars]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie – The journal of Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 1, pp. 117 – 122.
14. Egbert R. I., Scharag R. L., Bernhart W. D., Zumwalt G. W., Kendrew T. J. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods, *IEEE Power & Energy Society*, 1989, no. 4(3), pp. 1855 – 1861.
15. Antonov B. M., Isakaev Je. H., Korolev V. A., Mordynskij V. B., Son Je. E., Tereshonok D. V., Tjuftjaev A. S., Jusupov D.I. Mobile unit for ice melting on high-voltage power lines 110-220 kV and its energy efficiency [Mobil'naja ustanovka dlja plavki gololeda na provodah vysokovol'tnyh linij jelektroperedachi 110-220 KV i ee jenergojeffektivnost']. *Jenergija edinoj seti – The journal of Energy of a single network*, 2012, no. 5, pp. 26 – 31
16. Ratushnyak V. S., YUr'ev A. V., Il'in E. S., Truhina I. S., Ratushnyak V. S. *Patent RU 2666754 C1*, 12.09.2018.
17. Ratushnyak V. S., Garanin A. E., YUr'ev A. V., Il'in E. S. *Patent RU 2666225 C1*, 06.09.2018.
18. Demirchjan K. S., Nejman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). SPb: Piter, 2003, 576 p.
19. Farzaneh M. *Atmospheric Icing of Power Networks*, Springer, 2008, 381 p.

20. Rogov N. G., Gruzdev Ju. A. *Fiziko-himicheskie svoystva porohov i tvjordyh raketnyh topliv* (Physico-chemical properties of powders and solid rocket fuels). SPb: SPbGTI(TU), 2005, 200 p.

21. Dobroljubov V. A., Dobroljubova S. V. *Patent RU 2334278 C2*, 20.09.2008

22. Ji K., Rui X., Li L., Leblond A., McClure G. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces, *Computers & Structures*, 2015, no. 157, pp. 153 – 164.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ратушняк Валентина Сергеевна

Иркутский государственный университета путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецховели ул., д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru

Ратушняк Виктор Сергеевич

Иркутский государственный университета путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецховели ул., д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: ratushnyak_vs@krsk.irkups.ru

Ильин Евгений Сергеевич

Иркутский государственный университета путей сообщения (ИрГУПС).

Ладо Кецховели ул., д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: iluin_es @krsk.irkups.ru

Вахрушева Оксана Юрьевна

Иркутский государственный университета путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Ладо Кецховели, д. 89, г. Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: vakhrusheva_oy@krsk.irkups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ратушняк, В. С. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП [Текст] / В. С. Ратушняк, В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, О. Ю. Вахрушева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 102 – 111.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ratushnyak Valentina Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Lado Keckhoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

The post-graduate student of the department «Automation of production processes», ISTU.

Phone: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru

Ratushnyak Viktor Sergeevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Lado Keckhoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering Science Associate Professor of the department «Train traffic systems», ISTU.

Phone: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: ratushnyak_vs@krsk.irkups.ru

Ilyin Yevgeniy Sergeyeovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Lado Keckhoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

Ph.D. in Engineering Science Associate Professor of the department «Train traffic systems», ISTU.

Phone: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: iluin_es@krsk.irkups.ru

Vakhrusheva Oksana Yuryevna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

89, Lado Keckhoveli st., Krasnoyarsk, 660028, the Russian Federation.

The post-graduate student of the department «Automation of production processes», ISTU.

Phone: +7 (3912) 48-16-44.

E-mail: vakhrusheva_oy@krsk.irkups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ratushnyak V. S., Ratushnyak V. S., Il'in E. S., Vakhrusheva O. Y., Buzaev I. V. Some aspects of choice of means of fighting with the ice deposit on the power lines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 102 – 111 (In Russian).

УДК 621.317.77

В. В. Петров, К. С. Петров

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

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ
ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

***Аннотация.** В работе выполнено исследование формы вершины унимодальной функции плотности вероятности (эксцесса) на выходе нелинейного преобразователя «фазовый сдвиг – код», который является наиболее важным параметром для оценки условий нахождения моды этой функции. Для повышения точности оценки сдвигов фаз при наличии высокого уровня случайных помех определена не только качественная, но и количественная зависимость эксцесса функции плотности вероятности на выходе нелинейного преобразователя «фазовый сдвиг – код» от среднеквадратичного отклонения (СКО) флюктуации фазы сигнала на его входе. Предложена математическая модель функции распределения на выходе преобразователя «фазовый сдвиг – код» для исследования и реализации алгоритмов повышения помехоустойчивости измерения фазовых сдвигов между гармоническими составляющими тока и напряжения в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта.*

***Ключевые слова:** измерение, фаза, электроснабжение, нелинейность, стохастическое моделирование, помехоустойчивость, вероятность, мода, дисперсия, эксцесс.*

Vladimir V. Petrov, Konstantin S. Petrov

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

**IMPROVEMENT OF NOISE IMMUNITY OF DIGITAL PHASE-MEASURING
DEVICES FOR THE STUDY OF ELECTRODYNAMIC PROCESSES
IN TRACTION SUBSTATIONS OF RAILWAY TRANSPORT**

***Abstract.** In the work completed a study of shape vertices a unimodel probability density function (kurtosis) on the output of the nonlinear converter «phase shift – code, which is the most important parameter for evaluating conditions of finding mode to this function. To increase the accuracy of assessment shifts phases when there is high level of random noise is defined not only quality, but also quantitative dependence of the kurtosis probability density function on the output of the nonlinear converter «phase shift – code» of Standard deviation phase fluctuations of the signal at its input. The mathematical model of the distribution function on the output of the converter «phase shift – code» for research and implementation of algorithms improve noise immunity measure phase shifts between harmonic components of voltage and current in traction power supply rail transport networks.*

***Keywords:** measurement, phase, power supply, nonlinearity, stochastic simulation, noise immunity, probability, mode, variance, kurtosis.*

Важную роль в практических исследованиях электромагнитной совместимости и электродинамических процессов на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта играют цифровые фазоизмерительные устройства для оценки фазовых соотношений между различными гармоническими составляющими токов и напряжений в цепях питания мощных инвертеров и заземляющих устройствах [1]. При наличии несимметричности и резко переменного характера тяговой нагрузки, нестабильного контакта токоприемников электровозов, применения режимов рекуперативного торможения и мощных нелинейных импульсных преобразователей присутствует широкий спектр электромагнитных помех, которые негативно влияют на точность результатов измерений сдвига фаз.

В работах [2 – 4] описан помехоустойчивый алгоритм измерения сдвига фаз в указанных условиях и выполнен анализ предельно допустимого уровня помех, при котором предложенный способ сохраняет работоспособность. В этих статьях описан способ измерения, который основан на нахождении моды функции плотности вероятности мгновенных значений сдви-

гов фаз, сформированной за большое число периодов входных сигналов. Предложенный в статье [2] способ измерения сдвига фаз в диапазоне измерения $\pm\pi$, который исключает влияние нелинейности статической характеристики преобразователя «фазовый сдвиг – код (ПФСК) цифрового фазометра», исследован при условии нормального закона распределения плотности вероятности на входе фазоизмерительного устройства [5]. Выражение, описывающее нелинейность такой измерительной характеристики ПФСК, имеет вид:

$$y = x - 2\pi n, \text{ при } n = \text{int}(x/\pi), \quad (1)$$

где int – операция выделения целой части от результата деления x/π , а диапазон сдвига фаз на выходе ПФСК всегда находится в пределах $-\pi < y < +\pi$ [6].

Нелинейность (1) подобна периодическому графику процесса переполнения разрядной сетки ЭВМ при работе с форматом целых чисел со знаком, когда от максимального положительного числа происходит скачок к максимальному отрицательному значению, или наоборот. Такой вид нелинейности (типа «косозубая пила») обычно приводит к значительным искажениям показаний обычного цифрового фазоизмерительного устройства, использующего алгоритм усреднения сдвигов фаз за большое число периодов входного сигнала.

Графическая интерпретация процесса искажения функции плотности вероятности Гаусса p_x нелинейной периодической передаточной характеристикой ПФСК приведена на рисунке 1.

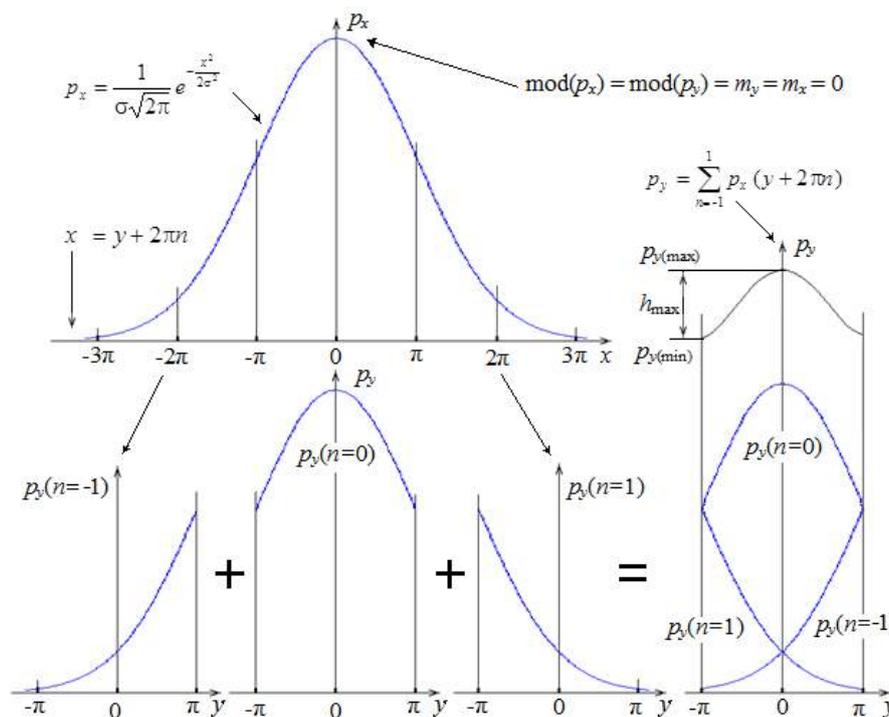


Рисунок 1 – Принцип влияния нелинейности статической характеристики ПФСК цифрового фазоизмерительного устройства на форму функции плотности вероятности p_y на выходе ПФСК

На рисунке 1 обозначено: p_x – функция плотности вероятности на входе ПФСК; p_y – функция плотности вероятности на выходе ПФСК; $p_{y(\max)}$ – максимальное значение плотности вероятности на выходе ПФСК; $p_{y(\min)}$ – минимальное значение плотности вероятности на выходе ПФСК; $h_{(\max)}$ – максимальное значение порога для идентификации значения моды функции p_y при больших флюктуациях фазы сигнала.

Целью данной работы является исследование эксцесса (формы вершины) функции плотности вероятности p_y на выходе ПФСК, который в основном и определяет условия нахождения моды этой функции. Для повышения точности оценки сдвигов фаз при наличии высо-

кого уровня случайных помех в первую очередь необходимо определить зависимость коэффициента эксцесса (параметр формы вершины) функции p_y от σ_x (СКО фазы сигнала на входе ПФСК). Для этого рассмотрим случай, когда на входе ПФСК, имеющего периодический ограниченный линейный диапазон измерительной характеристики в пределах $\pm\pi$, функция плотности вероятности сдвигов фаз p_x соответствует нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием:

$$p_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (2)$$

При этом нелинейная характеристика ПФСК (1) приводит к наложению «хвостов» p_x , превышающих пределы $\pm\pi$, на центральную часть функции плотности вероятности p_y , которая всегда находится в пределах $-\pi < y < +\pi$ [7]. Учитывая это, функция плотности вероятности на выходе ПФСК с периодической нелинейной статической характеристикой может быть описана выражением

$$p_y = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_x(y + 2\pi n), \quad (3)$$

где $x = y + 2\pi n$ – уравнение n -й ветви обратной зависимости $x(y)$ ПФСК, полученной из выражения (1). Подставив уравнение (2) в формулу (3), найдем общее выражение функции плотности вероятности на выходе ПФСК:

$$p_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(y+2\pi n)^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (4)$$

Практическая реализация алгоритма нахождения моды (максимального значения функции p_y) в реальном времени и в условиях высокого уровня случайных помех представляет весьма сложную задачу. В статье [2] предлагается вычислять первую разность функции p_y , (т. е. фактически находить нулевое значение первой производной $dp_y(y)/dy$) при условии, что разность между максимальным и минимальным значениями функции p_y больше заданного порога (т. е. $p_{y(\max)} - p_{y(\min)} > h_{(\text{зад})}$) [4]. Чувствительность этого алгоритма существенно зависит от скорости изменения функции p_y около ее моды, что определяется таким параметром, как эксцесс.

На рисунке 2 наглядно показано влияние СКО функции p_x на входе ПФСК на вид функции p_y на выходе ПФСК, т. е. представлена визуализация процесса снижения размаха и остроконечности вершины этой функции при увеличении σ_x .

Рисунок 2 демонстрирует качественную картину, когда эксцесс функции p_y существенно снижается при увеличении σ_x , но для построения математической модели этого процесса необходимо получить количественную зависимость изменения коэффициента эксцесса p_y от СКО функции p_x .

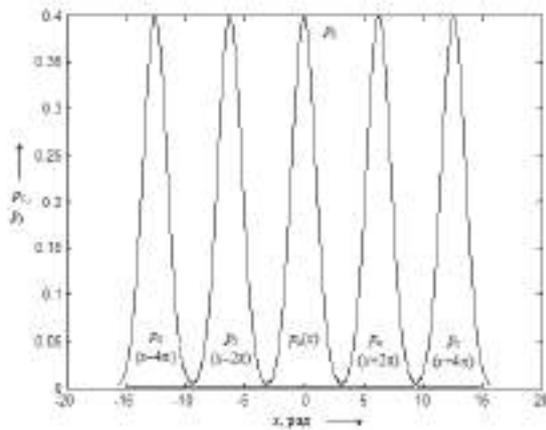
Так как функция (2) не интегрируема в аналитическом виде [8], то все дальнейшие вычисления будем реализовывать на основе численных методов с дискретным представлением функций, а результаты получим в табличном виде, на основе которых можно построить искомую функциональную зависимость. Выражение для нахождения k -го начального момента дискретной функции распределения [9] имеет вид:

$$\mu_k = \sum_{i=-m}^m (x_i)^k p_i. \quad (5)$$

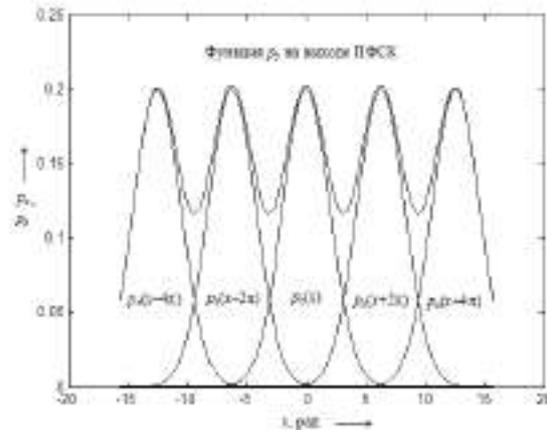
Первый начальный момент (математическое ожидание) дискретных функций распределения p_{xi} и p_{yi} на входе и выходе ПФСК можно определить так:

$$\mu_{x1} = \sum_{i=-m}^m x_i p_{xi}; \quad (6)$$

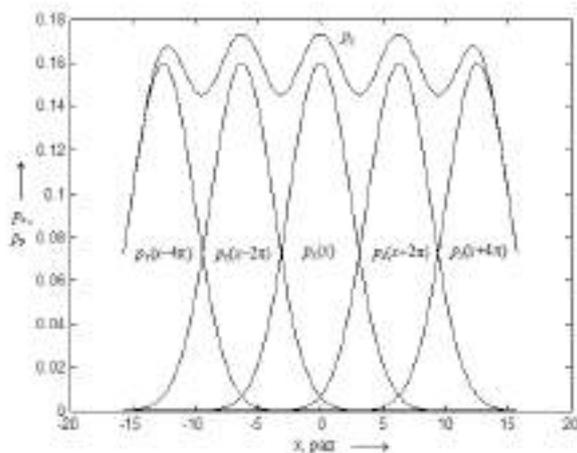
$$\mu_{y1} = \sum_{i=-m}^m y_i p_{yi}. \quad (7)$$



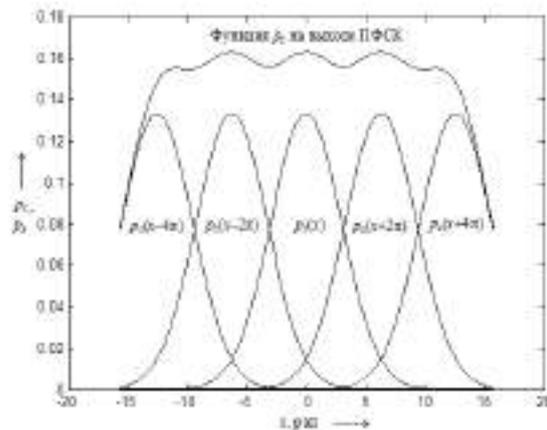
а



б



в



г

Рисунок 2 – Влияние СКО функции p_x на входе ПФСК в цифровом фазоизмерительном устройстве на форму функции плотности вероятности p_y на выходе ПФСК: а – функция p_y при $\sigma_x = 1$; б – функция p_y при $\sigma_x = 2$; в – функция p_y при $\sigma_x = 2,5$; г – функция p_y при $\sigma_x = 3$

Учитывая, что нечетные начальные моменты (μ_1 – математическое ожидание и μ_3 – асимметрия) симметричных относительно оси ординат дискретных функций p_{xi} и p_{yi} равны нулю, следует отметить, что они не несут для исследуемой модели важной информации. Для оценки степени сглаженности вершины этих функций достаточно найти в данном случае только четные моменты – μ_2 (дисперсию) и μ_4 (эксцесс). Вычисление этих начальных моментов дискретных функций распределения p_{xi} и p_{yi} можно выполнить на основе следующих выражений:

$$\mu_{x2} = \sum_{i=-m}^m (x_i)^2 p_{xi}; \quad (8)$$

$$\mu_{y2} = \sum_{i=-m}^m (y_i)^2 p_{yi}. \quad (9)$$

С учетом дискретного представления функций p_{xi} и p_{yi} подставим в формулы (8) и (9) выражения (2) и (4) соответственно, поменяем порядок суммирования и получим окончательные формулы для вычисления вторых начальных моментов (дисперсий) функций плотности вероятности на входе и выходе ПФСК:

$$\mu_{x2} = \frac{\Delta_\varphi}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \sum_{i=-m}^m (x_i)^2 e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma_x^2}}; \quad (10)$$

$$\mu_{y2} = \frac{\Delta_\varphi}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-m}^m (y_i)^2 e^{-\frac{(y_i+2\pi n)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (11)$$

где $\Delta_\varphi = \pi/m$ – коэффициент, обеспечивающий представление значения интервала квантования функций p_{xi} и p_{yi} и результата измерения фазоизмерительного устройства в радианах.

Выполняя аналогичные действия, находим выражения для вычисления четвертых начальных моментов (эксцессов) функций плотности вероятности p_{xi} и p_{yi} :

$$\mu_{x4} = \frac{\Delta_\varphi}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \sum_{i=-m}^m (x_i)^4 e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma_x^2}}; \quad (12)$$

$$\mu_{y4} = \frac{\Delta_\varphi}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-m}^m (y_i)^4 e^{-\frac{(y_i+2\pi n)^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (13)$$

Наиболее информативным параметром для оценки степени «заострения» или «гладкости» вершины функции плотности вероятности является относительное значение γ (безразмерный коэффициент эксцесса), величина которого не зависит от дисперсии

$$\gamma = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3, \quad (14)$$

причем для нормального закона распределения этот коэффициент по определению всегда равен нулю (т. е. теоретически для функции плотности вероятности Гаусса $\gamma_r = 0$).

Для вычисления значений μ_2 , μ_4 и γ необходимо в первую очередь определиться с пределами суммирования (значением параметра n) в выражениях (10) – (13), так как при программной реализации алгоритмов, использующих численные методы, необходимо задавать всегда конкретные значения параметров функций. Интервал квантования дискретных функций плотности вероятности p_{xi} и p_{yi} на всех этапах вычислений принимаем одинаковый – $\Delta_\varphi = \pi/m$ при $m = 360$, а значение n определим из условия обеспечения требуемой точности вычислений с учетом σ_x (СКО фазы на входе ПФСК). Результаты вычисления параметров дискретной функции p_{xi} с применением разработанной программы при различных значениях диапазона суммирования и различных СКО входного сигнала представлены в таблице 1. На основе полученных результатов можно оценить абсолютную погрешность вычисления коэффициентов эксцесса (γ_x) по формуле $\delta = |\gamma_x - \gamma_r|$ и сделать вывод о том, что разработанная программа гарантирует точность вычислений $\delta \leq 0,0001$ (до четвертого знака после запятой) даже при значении $n = 2$. Таким образом, вполне достаточно диапазона суммирования значений функции плотности вероятности p_x на входе ПФСК от -5π до $+5\pi$, что соответствует диапазону дискретных значений функции p_{xi} $-5m < i < +5m$.

Определившись с необходимым диапазоном суммирования значений функции p_{xi} ($-5m < i < +5m$) на основе сравнения с известными (теоретическими) параметрами этой функции, реализация которого гарантирует достаточную точность вычисления, можно приступить к нахождению параметров дискретной функции плотности вероятности p_{yi} на выходе ПФСК,

причем относительное значение порога достоверности идентификации определяем как отношение: $h_y = (p_{y(\max)} - p_{y(\min)}) / p_{y(\max)}$.

Таблица 1 – Зависимость параметров начальных моментов и абсолютной погрешности δ_x результатов вычисления коэффициентов эксцесса γ от диапазона суммирования функции p_x и значений параметра σ_x

| Диапазон суммирования | Параметр функции p_x | СКО функции плотности вероятности p_x на входе ПФСК | | | |
|--|------------------------|---|----------------|------------------|----------------|
| | | $\sigma_x = 1$ | $\sigma_x = 2$ | $\sigma_x = 2,5$ | $\sigma_x = 3$ |
| От -2π до $+2\pi$ ($-2m < i < +2m$) | μ_{x1} | -4,0069e-018 | 1,0839e-016 | -7,7266e-017 | 9,5674e-018 |
| | μ_{x2} | 1,0000 | 3,9217 | 5,6449 | 7,0013 |
| | μ_{x4} | 3,0000 | 44,2267 | 84,8628 | 122,8651 |
| | γ_{x2} | -4,7604e-007 | -0,1243 | -0,3368 | -0,4935 |
| | δ_{x2} | 0,0000 | 0,1243 | 0,3368 | 0,4935 |
| От -3π до $+3\pi$ ($-3m < i < +3m$) | μ_{x1} | 1,9322e-017 | -6,8019e-019 | 2,0280e-017 | 5,4816e-017 |
| | μ_{x2} | 1,0000 | 3,9998 | 6,2337 | 8,8234 |
| | μ_{x4} | 3,0000 | 47,9772 | 115,5188 | 223,8651 |
| | γ_{x3} | 4,8850e-015 | -0,0011 | -0,0272 | -0,1245 |
| | δ_{x3} | 0,0000 | 0,0011 | 0,0272 | 0,1245 |
| От -4π до $+4\pi$ ($-4m < i < +4m$) | μ_{x1} | 1,9991e-017 | 4,9826e-017 | -1,5227e-017 | -8,7768e-017 |
| | μ_{x2} | 1,0000 | 4,0000 | 6,2499 | 8,9951 |
| | μ_{x4} | 3,0000 | 48,0000 | 117,1731 | 242,1363 |
| | γ_{x4} | 6,2172e-015 | -4,8212e-007 | -2,8763e-004 | -0,0074 |
| | δ_{x4} | 0,0000 | 0,0000 | 0,0287 | 0,0074 |
| От -5π до $+5\pi$ ($-5m < i < +5m$) | μ_{x1} | 2,4062e-017 | 1,2618e-016 | -1,6189e-017 | -1,7800e-016 |
| | μ_{x2} | 1,0000 | 4,0000 | 6,2500 | 9,0000 |
| | μ_{x4} | 3,0000 | 48,0000 | 117,1875 | 242,9886 |
| | γ_{x5} | 6,2172e-015 | -1,4575e-011 | -4,8334e-007 | -1,1235e-004 |
| | δ_{x5} | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 |
| Теоретический от $-\infty$ до $+\infty$ | μ_{r1} | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | μ_{r2} | 1,0000 | 4,0000 | 6,2500 | 9,0000 |
| | μ_{r4} | 3,0000 | 48,0000 | 117,1875 | 243,0000 |
| | γ_r | 0 | 0 | 0 | 0 |

Используя выражения, полученные на основе конкретизации формул (7), (11), (13) и нелинейной характеристики ПФСК (1), а также с учетом выбранного диапазона суммирования определим первый начальный момент функции распределения плотности вероятности p_{yi} :

$$\mu_{y1} = \frac{\Delta_\phi}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} [C_{(n=0)} + C_{(n=1)} + C_{(n=-1)} + C_{(n=2)} + C_{(n=-2)}], \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{(n=0)} = \sum_{i=-m}^m y_i e^{-\frac{(y_i)^2}{2\sigma_x^2}} ; \\ C_{(n=1)} = \sum_{i=-m}^m y_i e^{-\frac{(y_i+2\pi)^2}{2\sigma_x^2}} ; \\ C_{(n=-1)} = \sum_{i=-m}^m y_i e^{-\frac{(y_i-2\pi)^2}{2\sigma_x^2}} ; \\ C_{(n=2)} = \sum_{i=-m}^m y_i e^{-\frac{(y_i+4\pi)^2}{2\sigma_x^2}} ; \\ C_{(n=-2)} = \sum_{i=-m}^m y_i e^{-\frac{(y_i-4\pi)^2}{2\sigma_x^2}} . \end{array} \right. \quad (16)$$

Теоретически момент μ_{y1} должен быть равен нулю, но из-за ограниченного числа $n = 2$ (вместо бесконечности) и накопления ошибок округления в процессе многократного суммирования дискретных значений функций этот параметр немного отличается от нуля, что косвенно можно использовать для оценки точности вычислений остальных параметров функции p_{yi} на выходе ПФСК.

Аналогично определим второй и четвертый начальные моменты функции распределения плотности вероятности на выходе ПФСК (p_{yi}):

$$\mu_{y2} = \frac{\Delta_{\phi}}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} [D_{(n=0)} + D_{(n=1)} + D_{(n=-1)} + D_{(n=2)} + D_{(n=-2)}], \quad (17)$$

$$\begin{cases} D_{(n=0)} = \sum_{i=-m}^m y_i^2 e^{-\frac{(y_i)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ D_{(n=1)} = \sum_{i=-m}^m y_i^2 e^{-\frac{(y_i+2\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ D_{(n=-1)} = \sum_{i=-m}^m y_i^2 e^{-\frac{(y_i-2\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ D_{(n=2)} = \sum_{i=-m}^m y_i^2 e^{-\frac{(y_i+4\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ D_{(n=-2)} = \sum_{i=-m}^m y_i^2 e^{-\frac{(y_i-4\pi)^2}{2\sigma_x^2}}. \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_{y4} = \frac{\Delta_{\phi}}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} [E_{(n=0)} + E_{(n=1)} + E_{(n=-1)} + E_{(n=2)} + E_{(n=-2)}], \quad (19)$$

$$\begin{cases} E_{(n=0)} = \sum_{i=-m}^m y_i^4 e^{-\frac{(y_i)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ E_{(n=1)} = \sum_{i=-m}^m y_i^4 e^{-\frac{(y_i+2\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ E_{(n=-1)} = \sum_{i=-m}^m y_i^4 e^{-\frac{(y_i-2\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ E_{(n=2)} = \sum_{i=-m}^m y_i^4 e^{-\frac{(y_i+4\pi)^2}{2\sigma_x^2}}; \\ E_{(n=-2)} = \sum_{i=-m}^m y_i^4 e^{-\frac{(y_i-4\pi)^2}{2\sigma_x^2}}. \end{cases} \quad (20)$$

Результаты вычисления параметров дискретной функции p_{yi} с применением разработанной программы при различных значениях СКО входного сигнала представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость значений начальных моментов и коэффициента эксцесса γ_y функции p_y на выходе ПФСК от σ_x на входе цифрового фазоизмерительного устройства

| Параметр функции p_y | СКО функции распределения плотности вероятности p_x на входе ПФСК | | | | |
|------------------------|---|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | $\sigma_x = 1$ | $\sigma_x = 1,5$ | $\sigma_x = 2$ | $\sigma_x = 2,5$ | $\sigma_x = 3$ |
| $p_{y(max)}$ | 0,3989 | 0,2660 | 0,2023 | 0,1731 | 0,1627 |
| $p_{y(min)}$ | 0,0057 | 0,0593 | 0,1162 | 0,1452 | 0,1556 |
| h_y | 0,9856 | 0,7769 | 0,4258 | 0,1615 | 0,0434 |
| μ_{y1} | -0,0031 | -0,0033 | -0,0064 | -0,0080 | -0,0085 |
| μ_{y2} | 0,9947 | 2,0075 | 2,7589 | 3,1267 | 3,2589 |
| μ_{y4} | 2,8866 | 9,6683 | 15,3979 | 18,2467 | 19,2719 |
| γ_y | -0,0827 | -0,6009 | -0,9771 | -1,1336 | -1,1854 |

На основе представленных в таблице 2 результатов вычислений можно сделать следующие выводы.

1) Коэффициент эксцесса γ_y функции p_y на выходе ПФСК зависит от значения СКО функции плотности вероятности p_x на входе ПФСК, что является следствием нелинейности статической характеристики реального ПФСК, входящего в состав цифрового фазоизмерительного устройства (в отличие от коэффициента γ_x , значение которого не зависит от σ_x).

2) Коэффициент эксцесса ($\gamma_y = -1,1854$ при $\sigma_x = 3$) функции p_y имеет отрицательный знак, поэтому при больших значениях σ_x вершина p_y в окрестностях моды этой функции становится более плоской, а уровень порога достоверности ($h_y = 0,0434$) существенно снижается. Эти обстоятельства усложняют задачу поиска моды в условиях высокого уровня помех и требуют применения более точной математической модели процесса на выходе ПФСК и более надежных алгоритмов идентификации.

3) Если внимательно рассмотреть график функции p_y в пределах $\pm 2\pi$, представленный на рисунке 3, то следует заметить, что уже при $\sigma_x > 1$ в качестве модели функции p_y можно использовать периодическую функцию типа $B \cos^2(x) + C$, что существенно сужает спектральный состав ее характеристической функции [10] и свидетельствует о перспективности применения такой модели для повышения точности идентификации моды p_y , а следовательно, и для повышения точности измерения сдвига фаз в условиях высокого уровня помех.

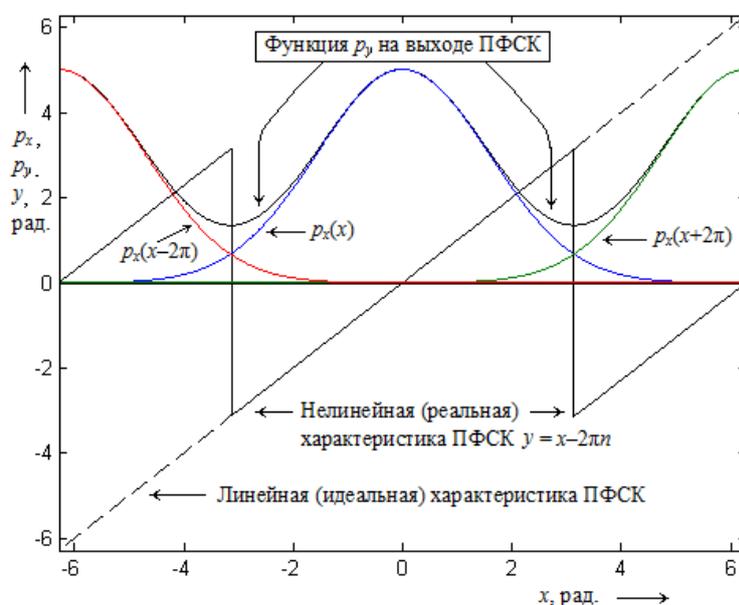


Рисунок 3 – Нелинейная характеристика реального ПФСК, имеющего две точки разрыва, и функция плотности вероятности p_y на входе ПФСК, которую можно заменить функцией $B \cos^2(x) + C$ в диапазоне $\pm \pi$

4) Для повышения точности определения моды функции p_y (т. е. результата измерения) в

описанных условиях следует применять интегральные методы идентификации моды, в основе которых лежит спектральный или корреляционный анализ.

Список литературы

1. Малютин, А. Г. Архитектурные аспекты реализации корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов [Текст] / А. Г. Малютин, А. А. Лаврухин, А. С. Окишев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – № 4 (32). – С. 130 – 141.
2. Петров, В. В. Измерение сдвигов фаз в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 4 (16). – С. 69 – 77.
3. Смалев, С. Н. Цифровая фазоизмерительная система в условиях приема наложенных сигналов [Текст] / С. Н. Смалев // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности: Материалы всерос. науч.-техн. интернет-конференции с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 135 – 140.
4. Петров, В. В. Применение помехоустойчивого способа измерения сдвига фаз в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 4 (20). – С. 105 – 111.
5. Петров, В. В. Фазовые измерения в условиях высокого уровня случайных помех [Текст] / В. В. Петров // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности: Материалы всерос. науч.-техн. интернет-конференции с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 116 – 123.
6. Тихонов, В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.
7. Петров, В. В. Оценка помехоустойчивости измерительных устройств при исследовании фазовых соотношений в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 113 – 123.
8. Прудников, А. П. Интегралы и ряды [Текст] / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 797 с.
9. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б. Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

References

1. Malyutin A. G., Lavrukhin A. A., Okihev A. S. Architectural aspects of the implementation of the corporate information system for monitoring and resources accounting [Architecturnye aspekty realizatsii korporativnoy informatsionnoy sistemy monitoringa i ucheta resursov]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (16), pp. 130 – 141.
2. Petrov V. V., Kogut A. T., Lavrukhin A. A. Measurement of phase shifts in traction networks AC railway trans-goad transport [Izmerenie sdvigoz faz v t'jagovykh setjakh peremennogo toka zheleznodorozhnogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 4 (16), pp. 69 – 77.
3. Smalev S. N. Digital fazoizmeritel'naja system in conditions of reception signals imposed [Tsifrovaja fazoizmeritel'naya sistema v uslovijah priema nalozhennykh signalov]. *Materialy vsrossijskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatsionnye i upravljutshie sistemy na transporte i v promyshlennosti» (Information and control systems in transport and in industry: Materials of all-Russian scientific and technical conference with international participation. Omsk State. University communications)*. Omsk, 2014. pp. 135 – 140.

4. Petrov V. V., Kogut A. T., Lavrukhin A. A. Application of noise measurement method of phase shift in traction power supply rail transport networks [Primenenie pomekhoustoichivogo sposoba izmereniya sdviga faz v tyagovykh setyakh elektrosnabzheniya zhelezno-dorozhnogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 105 – 111.

5. Petrov V. V. Phase measurement with high level of random noise [Fazovye izmereniya v usloviyakh vysokogo urovnya sluchajnykh pomekh]. *Materialy vserossijskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Informatsionnye i upravlyutshie sistemy na transporte i v promyshlennosti» (Information and control systems in transport and in industry: Materials of all-Russian scientific and technical conference with international participation. Omsk State. University communications)*. Omsk, 2014. pp. 116 – 123.

6. Tikhonov V. I. *Nelineinye preobrazovaniya sluchainykh protsessov (Nonlinear transformations of stochastic processes)*. Moscow: Radio i svjaz', 1986, 296 p.

7. Petrov V. V. Evaluation of noise immunity measurement devices in the study of phase correlations in traction networks AC railway transport. [Otsenka pomekhoustoichivosti izmeritelnykh ustroystv pri issledovanii fazovykh sootnosheniy v tyagovykh setyakh peremennogo toka zhelezno-dorozhnogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2(30), pp. 113 – 123.

8. Prudnikov A. P., Brychkov Iu. A., Marichev O. I. *Integraly i riady (Integrals and series)*. Moscow: Nauka, 1981, 797 p.

9. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki (Theoretical bases of statistical-radioengineering)*. Moscow: Radio i svjaz', 1989, 656 p.

10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers)*. Moscow: Nauka, 1973, 831 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Петров Константин Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студент ОмГУПСа, гр.15а.

Тел.: (3812) 31-06-45.

E-mail: MechanicalFaculty@OmGUPS.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, В. В. Повышение помехоустойчивости цифровых фазоизмерительных устройств для исследования электродинамических процессов на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, К. С. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. № 1 (37). – С. 112 – 121.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Chief scientific worker, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Petrov Konstantin Sergeevich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

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

The student OSTU, Gr. 15a.

Phone: (3812)) 31-06-45.

E-mail: MechanicalFaculty@OmGUPS.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov V. V., Petrov K. S. Improvement of noise immunity of digital phase-measuring devices for the study of electrodynamic processes in traction substations of railway transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 112 – 121 (In Russian).

Т. А. Дубровская

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Беларусь

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ДЛЯ ВВЕДЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Повышение скоростей движения на существующих железнодорожных линиях – одна из основных задач, стоящих перед Белорусской железной дорогой. Через территорию республики проходят два транспортных коридора, соединяющих между собой Россию и Западную Европу, а также Украину и страны Балтии. Во всех перечисленных странах повышение скоростей на железных дорогах идет очень быстрыми темпами. Беларусь не может оставаться в стороне. Однако чтобы повысить скорости, не всегда достаточно исходной информации. Чтобы выявить необходимые данные, используются методы теории принятия решений.

Метод интегрального вероятностного критерия (ИВК) позволяет обосновать параметры дороги, необходимые для введения скоростного движения на существующих линиях. С помощью предложенной методики принятия решения выбираются технические параметры и средства оснащения линии с учетом неопределенности при реконструкции плана линии для скоростного движения пассажирских поездов.

Исходными данными для определения ИВК является матрица рисков, или матрица частных критериев. При использовании матрицы рисков для каждого варианта проектных решений i составляются зависимости математического ожидания потерь от вероятности реализации расчетных условий p_n , изменяющейся в диапазоне от 0 до 1.

В статье по предложенной методике определены приведенные затраты для вариантов проектных решений при всех возможных расчетных условиях. С использованием этих затрат сформированы матрица частных критериев и матрица рисков. Выполнено сравнение вариантов проектных решений по интегральному вероятностному критерию, при использовании которого рекомендация выбора варианта однозначна и сопровождается количественной оценкой, что облегчает задачу лицу, принимающему решение.

Ключевые слова: железная дорога, реконструкция, скоростное движение, принятие решения, интегральный вероятностный критерий.

Tatyana A. Dubrovskaya

Belarusian State University of Transport (BelSUT), Gomel, the Belarus

SUBSTANTIATION OF RECONSTRUCTION PARAMETERS RAILWAY FOR INTRODUCING SPEED MOVEMENT WITH ACCOUNT UNCERTAINTY INITIAL INFORMATION

Annotation. Increasing speeds on existing railway lines is one of the main challenges facing the Belarusian railway. Through the territory of the republic there are two transport corridors connecting Russia and Western Europe, as well as Ukraine and the Baltic countries. In all of the above countries, the increase in speed on the railways is very fast. Belarus can not stand aside. However, to increase the speed, it is not always enough initial information. To identify the necessary data, methods of decision theory are used.

The integral probabilistic criterion method (CPI) allows one to substantiate the road parameters necessary for introducing high-speed traffic on existing lines. The proposed method of decision-making on the choice of technical parameters and equipment of the line, taking into account the uncertainty in the re-design for the high-speed movement of passenger trains.

The initial data for determining the CPI is a risk matrix or a matrix of particular criteria. When using the risk matrix for each design decision option i , the dependences of the expectation of losses on the probability of realization of the design conditions p_n , varying in the range from 0 to 1 are compiled.

In the article on the proposed methodology, the reduced costs for the variants of design solutions are determined under all possible design conditions. Using these costs, a matrix of private criteria and a risk matrix are formed. A comparison was made of the design decision options for the integral probabilistic criterion, using which the recommendation of choosing the option is unambiguous and is accompanied by a quantitative assessment, which facilitates the task to the decision maker.

Keywords: railway, reconstruction, speeding, decision making, integral probabilistic criterion.

Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге должны проектироваться так, чтобы были гарантированы безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затратах [1].

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности езды пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии: кривые малых радиусов, длины прямых вставок и переходных кривых увеличиваются для стабилизации подвижного состава на концах круговых кривых, пересечения с автодорогами осуществляются в разных уровнях, заменяются стрелочные переводы, переустраиваются пассажирские платформы. Кроме того, модернизируются устройства системы центральной блокировки и связи, усиливаются контактная сеть и тяговые подстанции, принимаются меры по защите окружающей среды [2].

При проведении реконструкции под скоростное движение возникает множество вариантов проекта, так как требуется решить, увеличится ли количество путей, будет ли строиться дополнительный путь, что повлечет за собой изменение полезной длины приемоотправочных путей, и т. д. Проблема принятия решений состоит в выборе одного из возможных вариантов реконструкции железной дороги. При решении поставленной задачи необходимо выбрать основные технические параметры дороги и средств ее технического оснащения, так как при их изменении меняется трасса железной дороги. Средства технического оснащения – вид тяги, тип локомотива, полезную длину приемоотправочных путей, тип вагонного состава, средства управления, тип графика движения поезда – в процессе эксплуатации дороги можно изменять.

Одним из решений поставленных задач проектирования реконструкции железной дороги являются *методы теории принятия решений* [3].

Задача принятия решений возникает при наличии цели; нескольких вариантов решения; ограничений, накладываемых на параметры системы, например, максимальное значение руководящего уклона, минимальная расчетная пропускная способность.

В данном исследовании принятие решения заключается в выборе одного из возможных вариантов реконструкции железной дороги под высокие скорости. Необходимость реконструкции железной дороги при введении скоростного движения поездов обусловлена рядом причин. Например, пассажирское движение снимает часть грузовых поездов, что особенно ощутимо в условиях возрастания скоростей движения пассажирских поездов. Основным показателем здесь является коэффициент съема, величина которого зависит от скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, длин перегонов и их неидентичности, путевого развития станций, расчетного межпоездного интервала и ряда других факторов. В этой связи может возникнуть необходимость усиления мощности дороги – увеличения ее пропускной и провозной способности.

В статье предложен вариант принятия решений на основе метода интегрального вероятностного критерия [4]. Суть метода заключается в использовании матрицы частных критериев. Выполняется анализ соответствия решений каждому из принятых к рассмотрению варианту расчетных условий. В случае необходимости решение должно быть оценено с учетом адаптации к данным расчетным условиям.

При использовании матрицы рисков для каждого варианта проектных решений i составляются зависимости математического ожидания потерь от вероятности реализации расчетных условий p_n , изменяющейся в диапазоне от 0 до 1 [5]:

$$M_{in}(p_n) = r_{in} p_n + \sum_{j=1}^{N-1} r_{ij} p_j, \quad (1)$$

где r_{in} – элемент матрицы риска для рассматриваемых расчетных условий;

r_{ij} – элемент матрицы риска при остальных расчетных условиях.

Вероятность реализации остальных расчетных условий принимается одинаковой:

$$p_j = \frac{1 - p_n}{N - 1}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в формулу (1), получаем:

$$M_{in}(p_n) = \left(r_{in} - \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1} \right) p_n + \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1}. \quad (3)$$

На основании матрицы частных критериев составляется матрица рисков (потерь) и выполняется расчет коэффициентов линейных уравнений k_{in} и b_{in} . Примем обозначения:

$$k_{in} = r_{in} - \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1}; \quad b_{in} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1}. \quad (4)$$

Производится анализ зависимостей $M_{in}(p_n)$ для определения однозначности решений. В результате получаем математическое ожидание потерь в виде линейного относительно p_n уравнения

$$M_{in}(p_n) = k_{in} p_n + b_{in}. \quad (5)$$

Таким образом, для каждого варианта расчетных условий $n \in N$ получаем систему линейных зависимостей из I уравнений, где I – количество решений в зоне неопределенности:

$$\sum_{n=1}^{n=N} k_{in} \cdot p = b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (6)$$

или в развернутом виде:

$$M_{1n}(p_n) = k_{1n} p_n + b_{1n}; \quad (7)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$M_{in}(p_n) = k_{in} p_n + b_{in}; \quad (8)$$

$$\dots \dots \dots$$

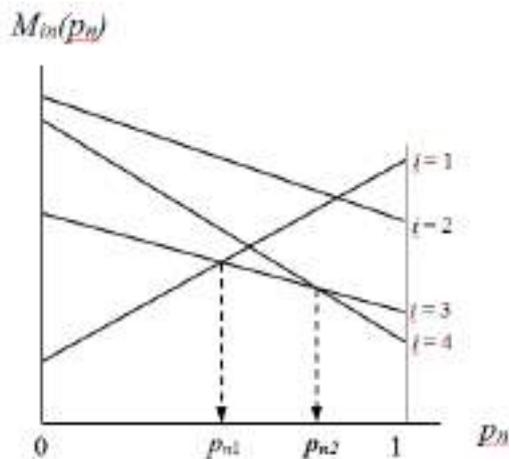
$$M_{ln}(p_n) = k_{ln} p_n + b_{ln}. \quad (9)$$

Зависимости решаются с помощью системы линейных уравнений и графика (рисунок), исключающего технические состояния, зависимости которых параллельны, а потери большие. Пересечения линий, характеризуемых этими уравнениями, позволяют установить границы вероятностей, при которых оптимальное и субоптимальное решения равноценны.

Анализ абсцисс этих точек пересечений позволяет установить интервалы вероятностей реализации расчетных условий, в которых то или иное решение является наиболее рациональным. Сначала определяется принадлежность абсциссы точки пересечения к интервалу $0 \leq p \leq I$. Точки вне интервала исключаются из рассмотрения. Далее выполняется поиск минимальной ординаты, т. е. устанавливается решение с минимальными показателями общего критерия анализируемых решений при данном значении вероятности.

Из оставшихся после анализа точек формируется вектор интервалов вероятностей оптимальных решений в данных расчетных условиях. В результате получаем интервалы изменения вероятности, в которых то или иное решение оптимально.

В некоторых случаях возможно, что результаты сравнения вариантов решений при всех значениях вероятностей дают однозначный ответ. Тогда наиболее рациональное решение очевидно.



Варианты соотношения зависимостей $M_{in}(p_n)$:
 p_{n1}, p_{n2} – граничные вероятности оптимальных решений

Основные технические параметры: руководящий уклон – 9 ‰; длина участка – 192 км; полезная длина приемоотправочных путей $l_{по} = 850$ м; число главных путей – два пути; вид тяги – электрическая переменного тока (ЧС4т, ВЛ80к); устройство системы центральной автоблокировки – автоблокировка; способ организации движения (вид графика) – пакетный; весовая норма $Q_{вн} = 3200$ т.

Размеры грузовых перевозок составляют 30 млн ткм/км в год; размеры пассажирского движения – 10 – 30 пар поездов в сутки.

В результате анализа возможных вариантов эксплуатации железной дороги после реконструкции для скоростного движения пассажирских поездов установлены два фактора неопределенности – размеры перевозок и величина стоимости пассажира-часа. Принято два варианта размеров пассажирского движения ($n_{псi}$ в парах поездов в сутки) и два варианта стоимости пассажира-часа ($e_{п-чj}$ в у. е. / п-ч): $n_{пс1} = 15$ пар поездов в сутки, $n_{пс2} = 25$ пар поездов в сутки, $e_{п-ч1} = 3,3$ у. е., $e_{п-ч2} = 6,6$ у. е. (у.е. – условная единица, принятая для удобства расчетов и приравниваемая к курсу доллара национального банка Республики Беларусь, т. е. 1 у. е. = 1 \$).

Таким образом, анализу подлежат $N = 2 \times 2 = 4$ варианта расчетных условий.

Расчетные условия $\Rightarrow n_{пс1} \cdot e_{п-ч1}, n_{пс1} \cdot e_{п-ч2}, n_{пс2} \cdot e_{п-ч1}, n_{пс2} \cdot e_{п-ч2}$.

После установления множества расчетных условий и назначения вариантов усиления мощности линии формируется матрица показателей частных критериев $\mathcal{E}_{чин}$.

В качестве критерия принят минимум суммы приведенных строительно-эксплуатационных затрат и стоимости времени нахождения пассажиров в пути на расчетный год эксплуатации

$$\mathcal{E}_ч = (K_{рек} + K_{пс} - K_{пс(возв)})E \pm C_t + C_{п-ч}, \quad (11)$$

где C_t – эксплуатационные расходы, млн у. е. / год.

К единовременным затратам, включенным в показатель критерия, отнесены капиталовложения на реконструкцию дороги ($K_{рек}$) и приобретение подвижного состава ($K_{п.с.}$). В расчетах принят приобретенный электропоезд Talgo 250, оборудованный системой наклона кузова вагонов.

Учтена возвратная стоимость за счет высвобождения используемых пассажирских вагонов и локомотивов ($K_{пс(возв)}$). Норма дисконта (E) взята равной 0,1.

Рассчитанные интервалы вероятности оптимальных решений служат основанием для вычисления интегрального вероятностного критерия по формуле

$$\alpha_p = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} \Delta p_j}{N}, \quad (10)$$

где $\Delta p_i = p_k - p_n$, p_k, p_n – значения вероятностей конца и начала интервала оптимального решения соответственно.

Рассмотрим метод ИВК на примере участка железнодорожной линии Москва – Минск – Берлин, расположенного во втором транспортном коридоре, проходящем по территории Республики Беларусь. На данном участке ближайшая перспектива повышения скоростей движения – со 140 до 200 км/ч.

Стоимость времени нахождения пассажиров в пути ($C_{п-ч}$) определена по формуле

$$C_{п-ч} = 3654n_{пс}m\alpha\Delta Te_{п-ч} \cdot 10^{-6}, \text{ млн у.е./год}, \quad (12)$$

где $n_{пс}$ – количество скоростных пассажирских поездов в сутки; m – вместимость поезда, чел.; α – коэффициент использования вместимости поезда в долях единицы; $e_{п-ч}$ – стоимость пассажиро-часа в рублях; ΔT – сокращение времени нахождения пассажиров в пути (в оба направления), ч.

В таблице 1 приведены результаты расчетов показателей критерия для принятых вариантов переустройства в различных расчетных условиях.

Таблица 1 – Матрица показателей частных критериев решений в различных расчетных условиях, млн у. е.

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|
| | $n_{пс} = 15$ пар поездов $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $n_{пс} = 25$ пар поездов $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $n_{пс} = 15$ пар поездов $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. | $n_{пс} = 25$ пар поездов $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удлинение $l_{по}$ | 105,20 | 113,49 | 111,02 | 147,82 |
| III путь | 109,76 | 123,81 | 115,57 | 146,13 |

На базе этих данных получена матрица рисков, показывающая дополнительные приведенные затраты (потери) по отношению к наиболее рациональному решению в каждом из расчетных условий (таблица 2). В каждом столбце матрицы находят минимальное значение $\min_i \Delta_{чин}$ и вычисляют разности по формуле

$$r_{in} = \Delta_{чин} - \min_i \Delta_{чин}. \quad (13)$$

Таблица 2 – Матрица рисков (потери)

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|
| | $n_{пс} = 15$ п. п./сут $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $n_{пс} = 25$ п. п./сут $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $n_{пс} = 15$ п. п./сут $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. | $n_{пс} = 25$ п. п./сут $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удлинение $l_{по}$ | 0 | 0 | 0 | 1,69 |
| III путь | 4,56 | 10,32 | 4,55 | 0 |

Анализ результатов показывает, что 1-й вариант (удлинение $l_{по}$) является лучшим в первом, втором, третьем и четвертом вариантах расчетных условий; 2-й вариант (III путь) – при четвертом условии.

Далее, согласно формуле (4) определяются угловые коэффициенты k_i и начальные ординаты b_i для всех принятых расчетных условий. Значения приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Значения угловых коэффициентов k_i

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | $n_{пс} = 15$ п. п. / сут | | $n_{пс} = 25$ п. п. / сут | |
| | $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. | $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удлинение $l_{по}$ | -0,56 | -0,56 | 0,56 | 1,11 |
| III путь | -2,64 | 2,63 | -8,40 | -2,64 |

Таблица 4 – Значения начальной ординаты b_i

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | $n_{пс} = 15$ п. п. / сут | | $n_{пс} = 25$ п. п. / сут | |
| | $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. | $e_{п-ч} = 3,3$ у. е. | $e_{п-ч} = 6,6$ у. е. |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удлинение $l_{по}$ | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 1,11 |
| III путь | 1,92 | 1,92 | 3,84 | 6,48 |

На следующем этапе выполняется анализ коэффициентов и значений общего критерия при $p_n = 0$ и $p_n = 1$. Установлено, что в расчетных условиях № 1 – 3 во всем диапазоне изменения вероятности от 0 до 1 оптимален вариант усиления линии за счет увеличения весовой нормы грузового поезда (удлинение $l_{по}$).

Координаты точек для оставшегося расчетного условия № 4 определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений [6].

Результаты расчета координат точек пересечения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Координаты точек пересечения зависимостей $M_{in}(p_n)$

| Проектные решения i | III путь | Удлинение $l_{по}$ |
|-----------------------|--|--------------------|
| Расчетное условие № 1 | | |
| Удлинение $l_{по}$ | Удлинение $l_{по}$ оптимально при $p_n = 0..1$ | |
| III путь | | |
| Расчетное условие № 2 | | |
| Удлинение $l_{по}$ | Удлинение $l_{по}$ оптимально при $p_n = 0..1$ | |
| III путь | | |
| Расчетное условие № 3 | | |
| Удлинение $l_{по}$ | Удлинение $l_{по}$ оптимально при $p_n = 0..1$ | |
| III путь | | |
| Расчетное условие № 4 | | |
| Удлинение $l_{по}$ | (0,75; 3,20) | – |
| III путь | – | (0,83; 2,59) |

В таблице 6 показаны интервалы вероятности оптимальных решений для всех вариантов расчетных условий.

Таблица 6 – Интервалы вероятности оптимальных решений

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Удлинение $l_{по}$ | 0...1,00 | 0...1,00 | 0...0,75 0,75...0,83 | 0...1,00 |
| III путь | – | – | 0,75...0,83 | – |

На заключительном этапе для окончательного определения оптимального решения выполняется расчет показателей интегрального вероятностного критерия для каждого из вариантов намеченных технических параметров реконструкции с целью усиления мощности линии (таблица 7).

Таблица 7 – Расчет интегрального вероятностного критерия

| Проектные решения i | Расчетные условия n | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----|------|-----|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | α |
| Удлинение $l_{по}$ | 1,0 | 1,0 | 0,75 | 1,0 | 0,91 |
| III путь | 0 | 0 | 0,25 | 0 | 0,09 |

Интегральный вероятностный критерий определяется по формуле (6).

Значение ИВК дает представление о вероятности, при которой данное решение будет оптимальным. Соответственно чем больше значение ИВК для данного решения, тем более вероятно, что это решение будет оптимальным.

Из данных таблицы 7 видно, что с вероятностью 91% для всех принятых расчетных условий за оптимальный следует принимать вариант решения по удлинению приемоотправочных путей, так как для данного решения значение интегрального вероятностного критерия будет максимальным. Преимущество данного варианта очевидно.

Список литературы

1. Руденко, Т. А. Перспективы развития скоростного движения поездов в Республике Беларусь [Текст] / Т. А. Руденко // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука МИИТа – транспорту» / МИИТ. – М., 2011. – С. II – 47 – II – 48.
2. Руденко, Т. А. Оценка эффективности внедрения скоростного движения в Республике Беларусь [Текст] / Т. А. Руденко // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука МИИТа – транспорту» / МИИТ. – М., 2013. – С. II – 14 – II – 15.
3. Халина, В. Г. Теория принятия решений: Учебник [Текст] / В. Г. Халина. – М.: Юрайт, 2016. – 250 с.
4. Миронов, В. С. Выбор технических параметров железных дорог при проектировании с учетом условий неопределенности [Текст] / В. С. Миронов, К. Ю. Ворончихин // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2004. – № 1. – С. 45 – 47.
5. Миронов, В. С. Поддержка принятия решения по выбору технических параметров железных дорог в условиях неопределенности [Текст] / В. С. Миронов, К. Ю. Ворончихин // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск. – 2004. – № 1. – С. 75 – 86.
6. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по высшей математике. Полный курс: Учебное пособие [Текст] / Д. Т. Письменный. – М.: Айрис Пресс, 2017. – 212 с.
7. Лемешко, В. Г. В интересах всех участников транспортного рынка [Текст] / В. Г. Лемешко // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 16 – 21.
8. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении их максимальных скоростей [Текст] / И. П. Корженевич, Д. Н. Курган и др. // Строительство / Днепропетровский национальный ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск. – 2002. – № 10. – С. 28 – 34.
9. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие [Текст] / П. С. Геворкян, А. В. Потемкин и др. – М.: Физматлит, 2016. – 176 с.
10. Принятие решений в условиях неопределенности: Учебник [Текст] / Л. А. Демидова, В. В. Кираковский и др. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 284 с.
11. Курбасов, А. С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества [Текст] / А. С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 20 – 23.

References

1. Rudenko T. A. Prospects for the development of high-speed trains in the Republic of Belarus [Perspektivy razvitiya skorostnogo dvizheniya poyezdov v Respublike Belarus']. *Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Наука МИИТа – транспорту»* (Materials Intern. scientific-practical conf. «Science МИИТа – transport»). Moscow, 2011, pp. II – 47 – II – 48.
2. Rudenko T. A. Otsenka effektivnosti vnedreniya skorostnogo dvizheniya v Respublike Belarus' [Evaluation of the effectiveness of the introduction of high-speed traffic in the Republic of Belarus]. *Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Наука МИИТа – транспорту»* (Materials Intern. scientific-practical conf. «Science МИИТа – transport»). Moscow, 2013, pp. II – 14 – II – 15.

3. Halina V. G. *Teoriya prinyatiya resheniy* (Decision making theory). Moscow: Yurayt, 2016, 250 p.
4. Mironov V. C., Voronchikhin K. YU. The choice of technical parameters of railways in the design, taking into account the conditions of uncertainty [Vybor tekhnicheskikh parametrov zheleznykh dorog pri proyektirovaniy s uchetom usloviy neopredelennosti]. *Aktual'nyye problemy razvitiya seti zheleznykh dorog regiona – collection of works Actual problems of development of the regional railway network*, 2004, no. 1, pp.45 – 47.
5. Mironov V. S., Voronchikhin K. YU. Decision support for the choice of technical parameters of railways in conditions of uncertainty [Podderzhka prinyatiya resheniya po vyboru tekhnicheskikh parametrov zheleznykh dorog v usloviyakh neopredelennosti]. *Aktual'nyye problemy razvitiya seti zheleznykh dorog regiona – collection of works Actual problems of development of the regional railway network*, 2004, no. 1, pp.75 – 86.
6. Pis'menny D. T. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike. Polnyy kurs* [Lecture notes in higher mathematics. Full course]. Moscow: Ayriss Press, 2017, 212 p.
7. Lemeshko V. G. In the interests of all participants in the transport market [V interesakh vseh uchastnikov transportnogo rynka]. *Zheleznodorozhnyy transport – The Railway journal*, 2011, no. 8, pp. 24 – 26.
8. Korzhenevich I. P., Kurgan D. N., Kurgan N. B., Rengach N. G. Evaluation of the main parameters of railway curves when establishing their maximum speeds [Otsenka osnovnykh parametrov zheleznodorozhnykh krivykh pri ustanovlenii ikh maksimal'nykh skorostey]. *Stroitel'sto – The journal Construction*, 2002, no 1 (17), pp. 28 – 34.
9. Gevorkyan P. S., Potemkin A. V., Eysymont. I. M. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* (Probability theory and mathematical statistics: a tutorial). Moscow: Fizmatlit, 2016, 176 p.
10. Demidova L. A., Kirakovskiy V. V., Pyl'kin A. N. *Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Decision making under uncertainty]. Moskva: Goryachaya liniya – Telekom, 2015, 284 p.
11. Kurbasov A. S. Increasing speeds on the railways of Russia: opportunities and advantages [Uvelicheniye skorostey na zheleznykh dorogakh Rossii: vozmozhnosti i preimushchestva]. *Zhurnal «Transport Rossiyskoy Federatsii» – Russian Transport journal*, 2011, no. 6 (37). pp. 20 – 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дубровская Татьяна Алексеевна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246031, Республика Беларусь.

Старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», БелГУТ.

Тел.: +37544 5545253.

E-mail: rt-555@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дубровская, Т. А. Обоснование параметров реконструкции железной дороги для введения скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации [Текст] / Т. А. Дубровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 122 – 129.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dubrovskaya Tatyana Alekseevna

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

St. Kirova, 34, Gomel, 246031, Republic of Belarus.

Senior Lecturer of the Department «Design, construction and operation of transport facilities» BelSUT.

Phone: +37544 5545253.

E-mail: rt-555@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Dubrovskaya, T. A. Justification of the parameters of the reconstruction of the railway for the introduction of speed, taking into account the uncertainty of the initial information. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, vol. 1, no 37, pp. 122 – 129 (In Russian).

УДК 658.5; 656.1.5

И. В. Ларина, А. Н. Ларин

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

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

***Аннотация.** В статье рассматривается задача управления качеством работы транспортного узла с учетом его эксплуатационных характеристик и с учетом стохастически независимых встречных пуассоновского и квазипуассоновского транспортных потоков. Задача решена с использованием аналитического и математического аппарата теории массового обслуживания. Результаты, полученные в статье, предполагается использовать для определения прогноза суммарной свободной грузоподъемности транспортных средств, ожидающих погрузки, длины очереди груженых транспортных средств (составов) в ожидании разгрузки, коэффициента использования полезных объемов складских комплексов.*

***Ключевые слова:** управление качеством, длина очереди груженых транспортных средств, транспортные потоки, теория массового обслуживания.*

Irina V. Larina, Andrey N. Larin

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

MANAGE QUALITY OF WORK OF TRANSPORT NODE GIVEN OPERATING CHARACTERISTIC

***Annotation.** The article considers the task of controlling the quality of work transport hub taking into account the performance given by stochastically independent Poisson counter and quairesonance traffic flows. The problem is solved with the use of analytical and mathematical apparatus of Queuing theory. The results obtained in the article are supposed to be used to determine the forecast of the total free capacity of vehicles waiting for loading, the queue length of loaded vehicles (trains) in anticipation of unloading, the coefficient of use of useful volumes of warehouse complexes.*

***Keywords:** quality management, queue length of loaded vehicles, traffic flows, Queuing theory*

В настоящее время важнейшим фактором для обеспечения главных целей стратегии любого предприятия является применение передовых методов управления качеством процессов на предприятиях. При применении данного подхода необходимо использовать интегрированный системный подход и методы и методики управления качеством процессов на предприятии для эффективного приведения к оптимуму всех бизнес-процессов и производственно-технологических процессов предприятия.

Управление деятельностью в области качества работы структурных подразделений холдинга, относящихся к транспортному узлу, проводится для обеспечения соответствия установленным требованиям к качеству работы подразделений и качеству их взаимодействия.

Управление качеством работы транспортного узла невозможно без использования жестких требований к организации работы в структурных подразделениях, расположенных в транспортном узле; выполнению структурными подразделениями требований к качеству работы транспортного узла; процессам взаимодействия между структурными подразделениями холдинга, расположенными в транспортном узле; порядку обмена информацией; решению разногласий между подразделениями; качеству выполняемых производственных процессов работы станции как узлообразующего структурного подразделения; совместному ведению проектов улучшения качества, в том числе управления рисками в обеспечении качества работы узла.

Транспортный узел представляет собой совокупность транспортных механизмов и устройств в пункте стыка нескольких видов транспорта, совместно выполняющих операции по обслуживанию всех видов перевозок [1]. Транспортные узлы являются неотъемлемой ча-

стью в организации комбинированных мультимодальных перевозок и совершенствовании интегрированного взаимодействия различных видов транспорта.

Для выявления всех особенностей технологических процессов работы транспортного узла необходимо провести исследование влияния важнейших процессов. В любом транспортном узле основополагающую роль играют погрузочно-разгрузочные процессы. Необходимо рассмотреть работу и воздействие производительности технических средств и механизмов, участвующих в погрузочно-разгрузочных операциях, непосредственно влияющих на пропускно-перерабатывающую возможность конкретного транспортного узла, которая основывается на применении статистического анализа. При этом методе используются фактические данные, позволяющие учесть реальное количество всех транспортных средств (железнодорожных составов и всех транспортных единиц) в транспортном узле с учетом длительности их грузовой обработки. Все перечисленные факторы приводят к возникновению очереди, что в свою очередь выражается длиной образуемых очередей. Применяя модель теории очередей (модель оптимального обслуживания), определим оптимальное число каналов обслуживания. Применение данной теории очередей к задачам управления качеством транспортного узла сводится к простому использованию известных формул для определения основных характеристик обслуживания, которые используются в простых моделях, описывающих с равным успехом работу и железнодорожного узла, и обычного предприятия. При рассмотрении транспортного узла видно, что постоянно внутри узла происходит взаимодействие одновременно разных видов потоков транспорта. Требуется учитывать данную особенность работы транспортного узла, которая приводит к возникновению дополнительных факторов, которые в свою очередь повышают сложность расчетных моделей транспортного узла. При составлении моделей транспортного узла необходимо использовать инновационные методы качественного и асимптотического анализа применительно к расчетам сложных вероятностных систем. Исследование процессов взаимодействия двух и более потоков событий влечет за собой с точки зрения математики большие трудности при анализе. Для транспортных потоков, которые непосредственно направлены навстречу друг другу, были предложены пути решения в работах [1 – 7], где были исследованы процессы образования очередей различной длины при погрузочно-разгрузочных работах груза, который являлся однородным, поступающим на транспортные средства. В качестве допущения в рассматриваемых задачах потоки по умолчанию рассматривались как регулярные или нерегулярные.

При оценке эксплуатационных характеристик транспортного узла рассматривался вариант, при котором груз берется как случайная величина, участвующая в погрузочно-разгрузочном процессе, с учетом незадействованных объемов транспортных средств и объемов складских мощностей, что в свою очередь является дальнейшим развитием предложенного метода в работе [2]. Для снижения тяжести предлагаемого подхода принимается, что работоспособность погрузочно-разгрузочных механизмов рассматриваемого транспортного узла не ограничена. Соответственно в предлагаемом подходе рассмотрен вопрос формирования очереди внутри транспортного узла за счет отсутствия груза на складских площадях и отсутствия свободных объемов складских комплексов с учетом подходов, рассмотренных в работах [8 – 10].

В предложенном подходе рассмотрено два существующих варианта взаимодействия транспортных потоков: первый вариант связан с погрузкой груза на автотранспорт, который прибыл в транспортный узел на железнодорожном транспорте, – прямая задача; второй вариант – погрузка груза на железнодорожный транспорт, который прибыл на автотранспорте, – обратная задача.

Так, при рассмотрении варианта, когда в транспортный узел поступают случайные независимые потоки автотранспорта и железнодорожного транспорта, принимаем, что поток автотранспорта – простейший поток с интенсивностью λ , а железнодорожного транспорта – вероятностный поток, зависящий от временного интервала с параметром ν , а распределение

вероятностей числа транспорта (состава) в одной группе $\{b_i\}$, $i = \overline{1, e}$, где e – максимально возможное число составов в группе, $\sum_{i=1}^e b_i = 1$.

При поступлении состава в транспортный узел без задержек происходит погрузочно-разгрузочный процесс при условии свободных объемов на транспорте и складах, причем временным промежутком, связанным с доставкой транспортных средств на погрузочно-разгрузочные фронты, пренебрегаем. Принимаем в качестве одного из допущений следующее: грузоподъемность автотранспорта измеряется в единицах грузоподъемности железнодорожного транспорта и является дискретной случайной величиной с распределением вероятностей $\{a_i\}$, $i = 0, 1, \dots, r$, где r – грузоподъемность наибольшего из рассматриваемых видов автомобильного транспорта в единицах грузоподъемности состава, $\sum_{i=1}^r a_i = 1$.

Вместимость складских терминалов считаем в единицах грузоподъемности равной v . Свободный объем на складских терминалах в тех же единицах в начальный момент времени $t = 0$ равен v_0 ($(v - v_0)$ – начальный запас груза на складском терминале). Упрощая метод расчета, округляем v и v_0 до целых чисел.

Так как работа транспортного узла предусматривает взаимосогласованность встречных транспортных потоков, то соответственно это предполагает зависимость между параметрами λ и v . Данная зависимость может быть установлена в интервале $(0, T)$ плана по переработке груза [2], тогда $\lambda \bar{r} T = v \bar{e} T = Q$, или

$$\lambda \bar{r} = v \bar{e}, \tag{1}$$

где $\bar{r} = \sum_{i=1}^r i a_i$; $\bar{e} = \sum_{i=1}^e i b_i$; Q – средний оборот переработки груза транспортного узла на период $(0, T)$. Тогда

$$\lambda = N/T, \tag{2}$$

где N – величина оборота автотранспорта в заданном интервале $(0, T)$.

По результатам расчетов величины полученных оценок для λ и v при весомой доле автотранспорта N достаточно точны для использования в расчетов эксплуатационных характеристик. В данных расчетах принят допуск, что в интервале $(0, T)$ нет регулирования подачи всех видов транспорта.

В случае небольшого количества автотранспорта и небольшого интервала времени влияние данного регулирования становится существенным, соответственно параметры λ и v (при $b_1 = 1, b_i = 0, i = 2, 3, \dots, e$) необходимо рассматривать из следующих условий:

$$J(\lambda, v) = J_1(\lambda, v) + J_2(\lambda), \tag{3}$$

где

$$J_1(\lambda, v) = \lambda v \int_0^\infty \int_0^\infty (x - y)^2 \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^N a_i \frac{(\lambda v)^{k-1} (vx)^{ki-1}}{(k-1)! (ki-1)!} e^{-\lambda y - vx} dy dx, \tag{4}$$

$$J_2(\lambda) = \lambda \int_0^\infty (y - T)^2 \frac{(\lambda y)^{N-1}}{(N-1)!} dy. \tag{5}$$

В данном случае рассматриваемое выражение

$$\lambda v \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (x-y)^2 \frac{(\lambda y)^{k-1} (vx)^{ki-1}}{(k-1)! (ki-1)!} e^{-\lambda x - vx} dy dx - \quad (6)$$

это средний квадрат отклонения времени поступления k -го по счету автотранспорта грузоподъемностью i от времени поступления партии из i транспорта (составов);

$J_1(\lambda, v)$ – средневзвешенная сумма всех таких отклонений.

Значение $J_2(\lambda)$ есть средний квадрат отклонения вероятного момента поступления последнего, N -го автотранспорта от планового момента T .

Тогда получим следующее:

$$J(\lambda, v) = \frac{N(N+1)}{2\lambda^2} \left[\frac{2N+1}{3} + 1 \right] - \frac{N(N+1)(2N+1)}{3\lambda v} \bar{r} + \quad (7)$$

$$+ \frac{N(N+1)}{2\lambda^2} \left[\frac{2N+1}{3} \left(\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} \right) + 1 \right] \bar{r} + \frac{N(N+1)}{\lambda^2} - \frac{2N}{\lambda} T + T^2,$$

где

$$\sigma_a^2 = \sum_{i=1}^r (i - \bar{r})^2 a_i. \quad (8)$$

В данном случае производные $\partial J / \partial \lambda$, $\partial J / \partial v$ приравняем к нулю, тогда система уравнений относительно $1/\lambda$, $1/v$ примет вид:

$$\frac{2(N+5)}{\lambda} - \frac{(2N+1)\bar{r}}{v} = \frac{6T}{N+1}; \quad (9)$$

$$\frac{2N+1}{3\lambda} - \frac{1}{v} \left[\frac{2N+1}{3} \left(\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} \right) + 1 \right] = 0.$$

Решая уравнение (9), получаем:

$$\lambda = (N+1) \frac{9(2N+1)\bar{r} + 6(N+5) + 2(N+5)(2N+1)\sigma_a^2/\bar{r}}{6T \left[(2N+1) \left(\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} \right) + 3 \right]}; \quad (10)$$

$$v = \lambda \left[\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} + \frac{3}{2N+1} \right]. \quad (11)$$

Принимая количество автотранспорта $N \gg 1$, получим приближенное равенство

$$v \approx \lambda \left(\bar{r} + \frac{\sigma_a^2}{r} \right), \quad (12)$$

которое будет отличаться от условия, показанного в уравнении (1) при $e = 1$, если $\sigma_a^2 \neq 0$.

Данный вариант рассматривался с точки зрения прямой задачи; с ее помощью получаем и решение обратной задачи путем лишь замены обозначений.

Обозначим $p_k(t)$ – вероятность нахождения груза (на транспорте и в складских комплексах) в транспортном узле во время t , имеется также определенный груз (на транспорте (составе) и в складских комплексах), который соответствует переработке грузов (грузоподъемности) k транспорта (составов), если $k \geq 0$. Если $k < 0$, то $p_k(t)$ – вероятность наличия свободных объемов складских комплексов, соответствующих грузоподъемности k транспорта (составов) в момент времени t .

Используем для дальнейших расчетов функции $G(t)$ – общая грузоподъемность порожнего автотранспорта в интервале t ; $g(t)$ – общее количество груза, находящегося на транспорте в интервале t ; $q(t)$ – общее количество груза, находящегося в складских комплексах в интервале t .

В качестве основных эксплуатационных характеристик транспортного узла принимаем усредненные математические ожидания для интервала $(0, T)$:

$$g_{cp} = g_{cp}(Q, v_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b) = \frac{1}{T} \int_0^T M[g(t)] dt; \quad (13)$$

$$G_{cp} = G_{cp}(Q, v - v_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b) = \frac{1}{T} \int_0^T M[G(t)] dt; \quad (14)$$

$$q_{cp} = q_{cp}(Q, v, v_0, \bar{r}, \bar{e}, \sigma_a, \sigma_b) = \frac{1}{T} \int_0^T M[q(t)] dt, \quad (15)$$

где

$$\sigma_b^2 = \sum_{i=1}^e (i - \bar{e})^2 b_i. \quad (16)$$

Заменим q_{cp} на коэффициент использования полезных объемов складских комплексов $k_{исп}$. Формула для расчета данного коэффициента имеет вид: $k_{исп} = q_{cp}/v$.

Примем в расчетах что $X(t)$ – количество случайно прибывших в узел транспортных средств (составов), в заданный интервал времени $(0, t)$; $Y(t)$ – количество автотранспорта, находящегося в узле в заданном интервале времени $(0, t)$; $\xi_k, k = 1, 2, \dots$ – количество составов, прибывших в k -й группе; $\zeta_k, k = 1, 2, \dots$ – суммарная величина грузоподъемности k -го автотранспорта, находящегося в данном узле.

Примем, что величины ξ_k и $\zeta_k, k \geq 1$ независимые, значения ξ_k распределяются в соответствии с законом $\{a_i\}, i = \overline{1, r}$, а значения ζ_k – по закону $\{b_i\}, i = \overline{1, e}$.

Тогда

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{X(t)} \xi_k; \quad \zeta(t) = \sum_{k=1}^{Y(t)} \zeta_k \quad (17)$$

($\xi(t) = 0$, если $X(t) = 0$, и $\zeta(t) = 0$, если $Y(t) = 0$).

Длина очереди груженых транспортных средств (составов) в ожидании разгрузки. Примем, что под длиной очереди составов понимается математическое ожидание общего количества груза, находящегося на транспортных средствах (составах) в очереди, $M[g(t)] = g_{cp}$.

Так как $g(t) = [\xi(t) - \zeta(t) - v_0]^+$, где $[u]^+ = \max(0, u)$, то $P_{k+v_0}(t) = P\{g(t) = k\} = P\{\xi(t) - \zeta(t) = k + v_0\}, k > 0;$

$$P\{g(t) = k\} = P\{\zeta(t) = \zeta(t) + k + v_0\} = \sum_{n=0}^{\infty} P\{\zeta(t) = n\} \cdot P\{\zeta(t) = n + k + v_0\}. \quad (18)$$

Транспортные потоки в рассматриваемой задаче – случайные потоки, тогда

$$\begin{cases} P\{\zeta(t) = n\} = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dz^n} e^{-\lambda t [1-a(z)]} \Big|_{z=0} = \sum_{i=1}^n A_{ni} (\lambda t)^{e-\lambda t}, n > 0; \\ P\{\zeta(t) = 0\} = e^{-\lambda t}; \\ P\{\xi(t) = n\} = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dz^n} e^{-vt [1-b(z)]} \Big|_{z=0} = \sum_{i=1}^n B_{ni} (vt)^i e^{-vt}, n > 0; \\ P\{\xi(t) = 0\} = e^{-vt}, \end{cases} \quad (19)$$

где

$$a(z) = \sum_{i=1}^r a_i z^i; \quad b(z) = \sum_{i=1}^e b_i z^i; \quad (20)$$

$$A_{ni} = \sum_{(j_1, \dots, j_n)} \frac{a_1^{j_1} a_2^{j_2} \dots a_n^{j_n}}{j_1! j_2! \dots j_n!}; \quad (21)$$

$$B_{ni} = \sum_{(j_1, \dots, j_n)} \frac{b_1^{j_1} b_2^{j_2} \dots b_n^{j_n}}{j_1! j_2! \dots j_n!}, \quad (22)$$

где

$$j_1 + j_2 + \dots + j_n = i; \quad j_1 + 2j_2 + \dots + nj_n = n. \quad (23)$$

В рассматриваемом примере $a_n = 0$ при $n > r$ и $b_n = 0$ при $n > e$. Совместим уравнения (19) и (18) и получим:

$$\begin{aligned} P\{g(t) = k\} = & \left\{ \sum_{j=1}^{k+v_0} B_{k+v_0, j} (vt)^j + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^n A_{ni} (\lambda t)^i \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[\sum_{j=1}^{n+k+v_0} B_{n+k+v_0, j} (vt)^j \right] \right\} e^{-(\lambda+v)t}, k > 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где $v = \lambda \bar{r} / e$.

Так, при $a_i = 0, i = 1, \overline{r-1}; a_r = 1; b_1 = 1; b_i = 0, i = 2$ формулу (24) можно представить в виде:

$$P\{g(t) = k\} = I_{k+v_0}(r, 2\lambda t) e^{-(1+r)\lambda t}, \quad (25)$$

где

$$I_p(r, x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(x/2)^i (rx/2)^{ri+p}}{i! (ri+p)!}, \quad p \geq 0; \quad (26)$$

$$\pi(z, t) = \sum_{k=1}^{\infty} P\{g(t) = k\} z^k = \sum_{k=1}^{\infty} I_{k+v_0}(r, 2\lambda t) z^k e^{-(1+r)\lambda t}; \quad (27)$$

$$\pi(z, t) = z^{-v_0} \left[F(z, t) - \sum_{k=1}^{v_0} I_k(r, 2\lambda t) z^k \right] e^{-(1+r)\lambda t}, \quad (28)$$

где

$$F(z, t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k(r, 2\lambda t) z^k. \quad (29)$$

Произведем дифференцирование по t :

$$\frac{\partial}{\partial t} F(z, t) = \lambda \left(rz + \frac{1}{z^r} \right) F(z, t) + \lambda rz I_0(r, 2\lambda t) - \frac{\lambda}{z^r} \sum_{k=1}^r I_k(r, 2\lambda t) z^k. \quad (30)$$

При условии $F(z, 0) = 0$ получим:

$$F(z, t) = \lambda e^{(rz+z^{-r})\lambda t} \int_0^t e^{-(rz+z^{-r})\lambda u} \left[rz I_0(r, 2\lambda u) - \frac{1}{z^r} \sum_{k=1}^r I_k(r, 2\lambda u) z^k \right] du; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \pi(z, t) = z^{-v_0} \left\{ \lambda e^{(rz+z^{-r})\lambda t} \int_0^t e^{-(rz+z^{-r})\lambda u} \left[rz I_0(r, 2\lambda u) - \frac{1}{z^r} \sum_{k=1}^r I_k(r, 2\lambda u) z^k \right] du - \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^{v_0} I_k(r, 2\lambda t) z^k \right\} e^{-(1+r)\lambda t}. \end{aligned} \quad (32)$$

По формуле (32) определяются моменты распределения длины очереди составов:

$$\begin{aligned} M[g(t)] = \frac{\partial}{\partial z} \pi(z, t) \Big|_{z=1} = \lambda \int_0^t e^{-(1+r)\lambda u} \left[\sum_{k=1}^r (v_0 + r - k) I_k(r, 2\lambda u) - \right. \\ \left. - r(v_0 - 1) I_0(r, 2\lambda u) \right] du + \sum_{k=1}^{v_0} (v_0 - k) I_k(r, 2\lambda t) e^{-(1+r)\lambda t}. \end{aligned} \quad (33)$$

При усреднении в интервале времени $(0, T)$ получим:

$$\begin{aligned} g_{cp} = \lambda \left\{ \int_0^T \left(1 - \frac{t}{T} \right) e^{-(1+r)\lambda t} \left[\sum_{k=1}^r (v_0 + r - k) I_k(r, 2\lambda t) - r(v_0 - 1) I_0(r, 2\lambda t) \right] dt \right\} + \\ + \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{v_0} (v_0 - k) \int_0^T e^{-(1+r)\lambda t} I_k(r, 2\lambda t) dt. \end{aligned} \quad (34)$$

Проведем упрощение выражения (34):

$$p_k(t) = P\{\xi(t) - \zeta(t) + v - v_0 = k\}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (35)$$

Обе части равенства (35) умножим на z^k и, суммируя по k от $-\infty$ до $+\infty$, получим:

$$Mz^{\xi(t) - \zeta(t) + v - v_0} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_k(t) z^k = z^{v-v_0} \exp \left\{ \lambda t \left[a \left(\frac{1}{z} \right) - 1 \right] + vt [b(z) - 1] \right\}; \quad (36)$$

$$\begin{aligned} Mz^{\xi(t)} &= \exp \left\{ \lambda t [a(z) - 1] \right\}; \\ Mz^{\zeta(t)} &= \exp \left\{ vt [b(z) - 1] \right\}. \end{aligned} \quad (37)$$

Примем в выражении (36) $k > 0$, тогда

$$p_k(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_c z^{-(k-v+v_0+1)} \exp \left\{ \lambda t \left[a \left(\frac{1}{z} \right) - 1 \right] + vt [b(z) - 1] \right\} dz; \quad (38)$$

$$M[g(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{k+v}(t); \quad (39)$$

$$M[g(t)] = \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{\exp \{ \lambda t [a(1/z) - 1] + vt [b(z) - 1] \}}{z^{v_0} (z-1)^2} dz. \quad (40)$$

Используем $\delta = v_0/Q$ – первоначальный свободный объем складского комплекса в единицах Q , тогда

$$g_{cp} = \frac{1}{2\pi i Q} \int_c \frac{f(z) \exp \{ Q [S(z) - \delta \ln z] \}}{(z-1)^4} dz, \quad (41)$$

где

$$S(z) = \frac{1}{r} a \left(\frac{1}{z} \right) + \frac{1}{e} b(z) - \frac{1}{r} - \frac{1}{e}; \quad f(z) = \frac{(z-1)^2}{S(z)}. \quad (42)$$

В выражении (41) $\int_c \frac{f(z) dz}{z^{v_0} (z-1)^4} = 0$. При интервалах времени T , соответствующих кварта-

лу, году, $Q \gg 1$. Так как v_0 соизмеримо с Q , то $\delta \in [0, 1]$.

Тогда $S(1) = S'(1) = 0, S''(1) = \left(\sigma_a^2 / \bar{r} + \bar{r} + (\sigma_a^2 / \bar{e}) + \bar{e} > 0 \right)$ и $f(z)$ аналитична при $|z| \geq 1$, т. е. все условия теоремы, доказанной Г. В. Поддубным [3], удовлетворены.

Вводим обозначения:

$$\begin{aligned} \beta_0(w) &= 3e^{-w^2/4} D_{-4}(w); \\ \beta_1(w) &= \frac{D_{-3}(w) - wD_{-4}(w)}{D_{-4}(w)}; \\ \beta_2(w) &= \frac{D_{-1}(w) - 3wD_{-2}(w) + 3w^2D_{-3}(w) - w^3D_{-4}(w)}{D_{-4}(w)}; \\ \phi(\rho_0) &= S(\rho_0) - \delta \ln \rho_0, \quad \psi(\rho_0) = S''(\rho_0) + \frac{S(\rho_0)}{\rho_0}; \\ \psi_1(\rho_0) &= S'''(\rho_0) - \frac{2\delta}{\rho_0^3}; \\ h_1(\rho_0) &= \frac{f'(\rho_0)}{f(\rho_0)} [\psi(\rho_0)]^{-1/2}; \\ h_2(\rho_0) &= \frac{1}{6} \psi_1(\rho_0) [\psi(\rho_0)]^{-3/2}; \\ w &= (\rho_0 - 1) [Q\psi(\rho_0)]^{1/2}, \end{aligned} \quad (43)$$

где $\rho_0 = \rho_0(\delta)$ – корень уравнения $xS'(x) - \delta = 0$ такой, что $\rho_0(0) = 1$; $D_k(w)$ – функция параболического цилиндра. Находим

$$g_{cp} = (Q, \delta, \bar{r}, \bar{l}, \sigma_a, \sigma_b) \approx \frac{1}{3} \sqrt{\frac{Q\Psi^3(\rho_0)}{2\pi}} f(\rho_0) \beta_0(w) e^{Q\phi(\rho_0) + w^2/2} \times [1 + (h_1(\rho_0)\beta_1(w) + h_2(\rho_0)\beta_2(w))Q^{-1/2}], \quad Q \gg 1. \quad (44)$$

При $v = 0$ из формулы (44) следует:

$$g_{cp} = (Q, \delta, \bar{r}, \bar{l}, \sigma_a, \sigma_b) \approx \frac{1}{3} f(1) \sqrt{\frac{Q[S''(1)]^3}{2\pi}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{Q}{2\pi} \left[\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} + \frac{\sigma_b^2}{l} - \bar{l} \right]}; \quad (45)$$

$$F(\rho_0(\delta)) = F(1) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta^n}{n!} \frac{d^{n-1}}{dz^{n-1}} \left\{ F'(z) \left[\frac{z-1}{zS'(z)} \right]^n \right\}_{z=1}; \quad (46)$$

$$F(\rho_0(\delta)) \approx F(1) + \frac{F'(1)}{S''(1)} \delta + \frac{\delta^2}{2[S''(1)]^2} \left[F''(1) - F'(1) \frac{2S''(1) + S'''(1)}{S''(1)} \right], \quad (47)$$

где $S'''(1) = -\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r i(i+1)(i+2)a_i + \frac{1}{e} \sum_{i=3}^e i(i-1)(i-2)b_i$.

Так как $M[q(t)] = \sum_{k=1}^v k p_k(t) + v \sum_{k=v+1}^{\infty} p_k(t)$, с учетом формулы (38) находим:

$$M[q(t)] = \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{z^{v+1} + v}{z^{v+1}(z-1)^2} \exp \left\{ \lambda t \left[a \left(\frac{1}{z} \right) - 1 \right] + vt [b(z) - 1] \right\} dz. \quad (48)$$

Тогда

$$q_{cp} = \frac{1}{2\pi i Q} \int_c \frac{f_1(z) \exp \{ Q[S(z) - \delta \ln z] \}}{(z-1)^4} dz, \quad (49)$$

где $f_1(z) = \frac{(z^{v+1} + v)(z-1)^2}{zS(z)}$.

Из уравнения (49) видно, что асимптотика q_{cp} (и, следовательно, $k_{исп}$) при $Q \rightarrow \infty$ определяется формулой (44) с учетом того, что $f(z)$ заменим на $f_1(z)$. При $v_0 = 0$ получаем:

$$k_{исп} \approx \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{v} \right) \sqrt{\frac{Q}{2\pi} \left[\frac{\sigma_a^2}{r} + \bar{r} + \frac{\sigma_a^2}{e} + \bar{e} \right]}, \quad G \gg 1. \quad (50)$$

Суммарная свободная грузоподъемность транспортных средств, ожидающих погрузки. Для определения G_{cp} исходим из равенства

$$p_{-k}(t) = P \{ \zeta(t) - \xi(t) - (v - v_0) = k \}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (51)$$

Так как $M[G(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{-k}(t)$, то

$$M[G(t)] = \frac{1}{2\pi i} \int \frac{\exp\left\{\lambda t[a(z)-1] + vt\left[b\left(\frac{1}{z}\right)-1\right]\right\}}{z^{v-v_0}(z-1)^2} dz, \quad (52)$$

тогда

$$G_{cp} = \frac{1}{2\pi i Q} \int_c \frac{\hat{f}(z) \exp\{Q[\hat{S}(z) - \delta \ln z]\}}{(z-1)^4} dz, \quad (53)$$

где $\hat{S}(z) = \frac{1}{r}a(z) + \frac{1}{e}b\left(\frac{1}{z}\right) - \frac{1}{r} - \frac{1}{e}$, $\hat{f}(z) = \frac{(z-1)^2}{\hat{S}(z)}$, $\delta = \frac{v-v_0}{Q}$.

Полученные g_{cp} , G_{cp} и $k_{исп}$ – это выражения для решения и обратной задачи. С помощью данных результатов можно определять оптимальные значения v и v_0 при конкретном грузообороте Q .

Применяя описанные методы, можно строить модели управления качеством работы транспортного узла с учетом своевременного прогнозирования таких показателей, как суммарная свободная грузоподъемность транспортных средств, ожидающих погрузки; длина очереди груженых транспортных средств (составов) в ожидании разгрузки; коэффициент использования полезных объемов складских комплексов. Своевременно полученные сведения по данным показателям позволят сократить время ожидания погрузки-разгрузки транспортных средств, рационально использовать объемы складских комплексов и транспортных средств, улучшить качество работы узла в целом.

Список литературы

1. Зильдман, В. Я. Взаимодействие встречных транспортных потоков, имеющих пуассоновский характер при отсутствии регулирования [Текст] / В. Я. Зильдман, Г. В. Поддубный // Математические методы решения экономических задач. – М.: Наука, 1977. – Вып.3. – С. 524 – 535.
2. Зильдман, В. Я. Влияние резервов складских емкостей на простой транспортных средств при наличии полного регулирования [Текст] / В. Я. Зильдман, Г. В. Поддубный // Математические методы решения экономических задач. – М.: Наука, 1974. – Вып. 6. – С. 167 – 179.
3. Поддубный, Г. В. Асимптотическое разложение одного класса интервалов со сливающимся плюсом и точкой перевала [Текст] / Г. В. Поддубный // ЖВМ и МФ. – 1982. – № 5. – С. 1052 – 1060.
4. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта при передаче контейнеропотока на основе принципов логистики [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.08 / Никифорова Гузель Ислямовна. – СПб, 2005. – 195 с.
5. Райя, С. Оптимизация грузопотоков в мультимодальных системах с двусторонними перевозками [Текст] / С. Райя // Транспорт: наука, техника, управление / Всероссийский институт научной и технической информации РАН. – М. – 2000. – № 12. – С. 10 – 14.
6. Фомин, Г. П. Системы и модели массового обслуживания в коммерческой деятельности [Текст] / Г. П. Фомин. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 144 с.
7. Хинчин, А. Я. Математические методы теории массового обслуживания [Текст] / А. Я. Хинчин. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1955. – 202 с.
8. Назаров, А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем [Текст] / А. В. Назаров, А. И. Лоскутов. – СПб: Наука и техника, 2003. – 384 с.
9. Рыжиков, Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии [Текст] / Ю. И. Рыжиков. – СПб: Корона принт; М.: Альтекс-А, 2004. – 384 с.

10. Тихонова, Н. А. Методы имитационного моделирования при исследовании систем железнодорожного транспорта [Текст] / Н. А. Тихонова/ Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2004. – 108 с.

References

1. Zildman V. Y., Poddubnyj G. V. Interaction of the counter transport flows having poisson character in the absence of regulation [Vzaimodejstvie vstrechnyx transportnyx potokov, imeyushih puassonovskij karakter pri otsutstvii regulirovaniya]. *Matematicheskie metody resheniya ekonomicheskix zadach – Mathematical methods of the solution of economic tasks*. Moscow, Science, 1977, no. 3, pp. 524 – 535.

2. Zildman V. Y., Poddubnyj G. V. Influence of reserves of warehouse capacities on idle time of vehicles in the presence of full regulation [Vliyanie rezervov skladskix emkostej na prostoj transportnyx sredstv pri nalichii polnogo regulirovaniya]. *Matematicheskie metody resheniya ekonomicheskix zadach – Mathematical methods of the solution of economic tasks*. Moscow, Science, 1974, no. 6, pp. 167 – 179.

3. Poddubnyj G.V. Asymptotic decomposition of one class of intervals with the merging plus and a point of the [Asimptoticheskoe razlozhenie odnogo klassa intervalov so slivayushhimsya plusom i tochkoj perevala]. *ZVM i MF – MHM and MP*, 1982, no. 5, pp. 1052 – 1060.

4. Nikiforova G. I. *Vzaimodejstvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta pri peredache kontejneropotoka na osnove principov logistiki* (Interaction of railway and sea transport during container traffic on the basis of logistics principles). Ph. D. thesis. SPb, 2005, 195 p.

5. Raya S. Optimization of cargo flows in multimodal systems with bilateral transportation [Optimizaciya gruzopotokov v mul'timodal'nyh sistemah s dvustoronnimi perevozkami]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniem – Transport: science, technology, management*, 2000, no. 12, pp. 10 – 14.

6. Fomin G. P. *Sistemy i modeli massovogo obsluzhivaniya v kommercheskoj deyatel'nosti* (Systems and models of mass service in commercial activity). M.: Finance and statistics, 2000, 144 p.

7. Khinchin A. I. *Matematicheskie metody teorii massovogo obsluzhivaniya* (Mathematical methods of Queuing theory) M.: Publishing house of Academy of Sciences of the USSR, 1955, 202 p.

8. Nazarov A. V. Loskutov A. I. *Nejrosetevye algoritmy prognozirovaniya i optimizacii sistem* (Neural network algorithms for forecasting and optimization systems). SPb.: Science and technology, 2003, 384 p.

9. Ryzhikov Yu. I. *Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i tekhnologii* (Simulation modeling. Theory of technology). SPb.: CROWN print; M: Altex-A, 2004, 384 p.

10. Tikhonova N. *Metody imitacionnogo modelirovaniya pri issledovanii sistem zheleznodorozhnogo transporta* (Methods of simulation in the study of railway transport systems). Омск, 2004, 108 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ларина Ирина Вячеславовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистики и управления качеством», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-48.

E-mail: larinai73@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larina Irina Vyacheslavovna

Omsk state transport university (OSTU).

644046, Omsk, prospect marksa,35.

Candidate of economic sciences, associate professor of transport economics, logistics and quality management", OmSTU.

Phone: (3812) 31-06-48.

E-mail: larinai73@mail.ru

Ларин Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистики и управления качеством», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Larinan75@mail.ru

Larin Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Economics of transport, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Larinan75@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ларина, И. В. Управление качеством работы транспортного узла с учетом эксплуатационных характеристик [Текст] / И. В. Ларина, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 130 – 141.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Larina I. V., Larin A. N. Management of the quality of work transport hub taking into consideration the operational characteristics arina. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no 37, pp. 130 – 141 (In Russian).

УДК 656.2

А. Н. Шендалев, О. А. Шендалева

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

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ УРОВНЯ РИСКОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы анализа и оценки рисков эксплуатации логистической инфраструктуры ОАО «РЖД». Актуальность статьи определяется практической направленностью и значимостью алгоритмизации оценки уровня рисков, возникающих в процессе эксплуатации объектов ОАО «РЖД». Целью статьи является разработка алгоритма оценки рисков, основанных на статистике событий и отказов, имеющейся в распоряжении ОАО «РЖД». Предметом исследования выступают риски, возникающие в процессе эксплуатации объектов логистической инфраструктуры. Объектом исследования определена логистическая инфраструктура ОАО «РЖД». Рассматривается подход к анализу и предлагается алгоритм анализа рисков с учетом особенностей эксплуатации логистических объектов с использованием статистических и экспертных оценок.

Ключевые слова: риск, логистическая инфраструктура, алгоритм, оценка рисков.

Alexander N. Shendalev, Olga A. Shendaleva

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

ALGORITHM FOR RISK ASSESSMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Annotation. The article deals with the issues of analysis and risk assessment of the operation of the logistics infrastructure of Russian Railways. The relevance of the article is determined by the practical orientation and significance of the issue relevant to the operation of the facilities of JSC “Russian Railways”. The aim of the article is to develop a risk assessment algorithm based on the statistics available to JSCo Russian Railways. The subject of research is the risks arising during operation. The object is the logistics infrastructure of Russian Railways. An analysis approach is considered and a risk analysis algorithm is proposed taking into account the specifics of the operation of logistics facilities using statistical and expert assessments.

Keywords: Risk, logistic infrastructure, log rate, risk assessment.

В 2018 г. ОАО «РЖД» рассматривает вопрос об отказе от платформы SAP и переходе на иную информационную систему в рамках программы импортозамещения. С большой долей

вероятности будет использоваться платформа 1С. Данная программная платформа ориентирована на ведение финансового и управленческого учета и может быть настроена на стандарты учета ОАО «РЖД», однако в отличие от 1С SAP имеет возможность анализировать риски. Реализованная система ЕК АСУИ ИССО позволяет проводить систематический анализ рисков и планировать предупреждающие мероприятия. Фактически на момент перехода с одной платформы на другую функция анализа рисков перестает быть интегрированной в систему учета и анализа эксплуатационной деятельности. В действующей системе ЕК АСУИ ИССО анализ рисков неотъемлемо связан с техническим состоянием объектов инфраструктуры и их техническими параметрами эксплуатации. В платформе 1С анализ рисков сводится к анализу рисков финансовых операций (построение коэффициентов осмотрительности, платежной дисциплины, финансового риска и пр.).

Особую сложность представляет вопрос анализа рисков объектов ОАО «РЖД», выступающих элементами логистической инфраструктуры. К ней следует отнести оборудование для хранения грузов, проведения погрузочно-разгрузочных работ, транспортировки, средств коммуникации и связи, а также складские помещения, краны, подъездные пути. Сложность вызвана тем, что в отношении данных объектов не ведется оперативного систематического сбора информации в процессе эксплуатации, а их состояние оценивается на основании проводимых сезонных или регламентных осмотров.

К числу рисков, воздействующих на логистическую инфраструктуру, которые следует оценивать для разработки предупреждающих мероприятий, можно отнести риски полного отказа объектов логистической инфраструктуры; ненадлежащего функционирования объектов логистической инфраструктуры в силу условий эксплуатации; ненадлежащего функционирования объектов логистической инфраструктуры в силу технологических и конструктивных особенностей; ненадлежащего функционирования объектов логистической инфраструктуры в силу природно-климатических, экологических и иных условий; несоответствия объектов логистической инфраструктуры требуемым параметрам; порчи и хищения товарно-материальных ценностей в силу ненадлежащих условий функционирования.

В конечном счете отсутствие оценок рисков, корректирующих мероприятий, разработанных на базе оценок, приводит к увеличению стоимости эксплуатации объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» [2,6].

Если представить стоимость владения объектом логистической инфраструктуры или элемента подвижного состава в виде обобщенной логической формулы, то она будет иметь вид [3]:

$$C_{\text{вл}} = C_{\text{приобр}} + C_{\text{ро}} + C_{\text{модер}} + C_{\text{риск}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{вл}}$ – стоимость владения объектом;

$C_{\text{приобр}}$ – стоимость его приобретения;

$C_{\text{ро}}$ – стоимость планового ремонта и обслуживания;

$C_{\text{модер}}$ – стоимость модернизации;

$C_{\text{риск}}$ – стоимость минимизации убытков, возникших в силу рисков событий.

Очевидно, что минимизация затрат на эксплуатацию в существующих технических и организационных условиях возможна прежде всего за счет минимизации стоимости рисков событий.

Анализ эксплуатационных рисков важен и с точки зрения управления, так как бесперебойная и ритмичная работа определяет возможность выполнения структурными подразделениями, владеющими рисковыми объектами, поставленных перед ними планов.

Вопрос анализа риска особенно актуален для элементов логистической инфраструктуры, которые по сути являются «узким» местом, регулирующим оборот подвижного состава и во

многим обуславливающим возможность максимизации получения прибыли за счет перевозок [1]. Связано это со специфическими условиями и числом пользования объектами. Анализ рисков, последующая разработка и применение предупреждающих и корректирующих мероприятий осложняются тем, что отдельные элементы инфраструктуры могут принадлежать различным структурным подразделениям и сторонним юридическим лицам, что ограничивает возможность влияния на риски. Это в свою очередь ведет к снижению предсказуемости расходов и к потенциальному возрастанию внереализационной составляющей в совокупных расходах организации.

Важность рассматриваемого вопроса и отсутствие текущей возможности реализовать в программной платформе 1С процессы мониторинга и анализа рисков определяют необходимость разработки алгоритма анализа и оценки рисков инфраструктуры с возможностью последующей программной реализации.

Для осуществления поставленной цели предполагается реализация следующих этапов:

- исследование статистической отчетности ОАО «РЖД»;
- анализ практики оценки рисков инфраструктуры в вертикально-интегрированных компаниях;
- разработка общего алгоритма оценки рисков;
- разработка рекомендаций для структурных подразделений ОАО «РЖД» по анализу логистических рисков.

Анализ и оценка рисков предполагают периодическое изучение и оценку технического состояния объектов логистической инфраструктуры непосредственно в процессе их эксплуатации. В процессе анализа и оценки рассматривается соответствие технических характеристик объекта установленным требованиям, оценивается техническое состояние составляющих элементов объектов логистической инфраструктуры, анализируются динамика и статистика отказов и случаев и специфические условия, влияющие на объект логистической инфраструктуры. В ходе изучения статистических данных и эксплуатационных сведений об объекте логистической инфраструктуры выявляются ситуации проявления рисков – когда техническое состояние логистической инфраструктуры меняется к худшему.

К ухудшению состояния логистической инфраструктуры приводят различные воздействия, т. е. ситуации, в которых реализуются события, не характерные для нормального функционирования объектов инфраструктуры и подвижного состава. Риски цепи поставок, участником которой выступает ОАО «РЖД», могут проявляться таким образом, что с момента начала эксплуатации объекта логистической инфраструктуры потенциальные угрозы могут ни разу не реализоваться либо реализовываться лишь эпизодически в полной или неполной форме. В этом случае сведений об изменении состояния в связи с такими воздействиями будет недостаточно [1].

Таким образом, в рамках алгоритма определения рисков эксплуатации логистической инфраструктуры должны в равной степени присутствовать возможность статистического и экспертного оценивания.

Статистические наблюдения позволяют сформировать априорную оценку частоты реализации различных угроз в условиях недостатка данных наблюдений. Экспертные методы позволяют учесть риски инфраструктуры, проявляющиеся по аналогичным объектам, находящимся в собственности или доверительном управлении иных хозяйствующих субъектов, а также учесть специфические условия внешней среды и особенности эксплуатации объектов логистической инфраструктуры ОАО «РЖД» [4, 5].

Отправной точкой алгоритма выступает распределение объектов инфраструктуры на пять групп, взаимосвязь между которыми приведена на рисунке 1.

Оценка состояния элементов логистической инфраструктуры, их распределение по группам осуществляются на базе сведений, полученных в ходе их технического обслуживания. Каждая группа представляет собой объединенный по признаку технического состояния набор объектов логистической инфраструктуры:

Гр₄ – если объект логистической инфраструктуры полностью не способен выполнять свои функции (из-за разрушения или существенного повреждения либо запрета на эксплуатацию);

Гр₃ – если из-за имеющихся неисправностей и (или) некомплектности объекта логистической инфраструктуры при его эксплуатации имеются ограничения на проведение логистических операций, в том числе на переработку грузов;

Гр₂ – это группа объектов логистической инфраструктуры, для которых диагностированы неисправности либо имеются нормативные ограничения по мощности, которые могут привести к состоянию Гр₄;

Гр₁ – к этой группе относятся объекты с малыми отклонениями в эксплуатационных характеристиках, которые могут быть устранены в ходе операционной эксплуатации;

Гр₀ – если неисправностей нет.

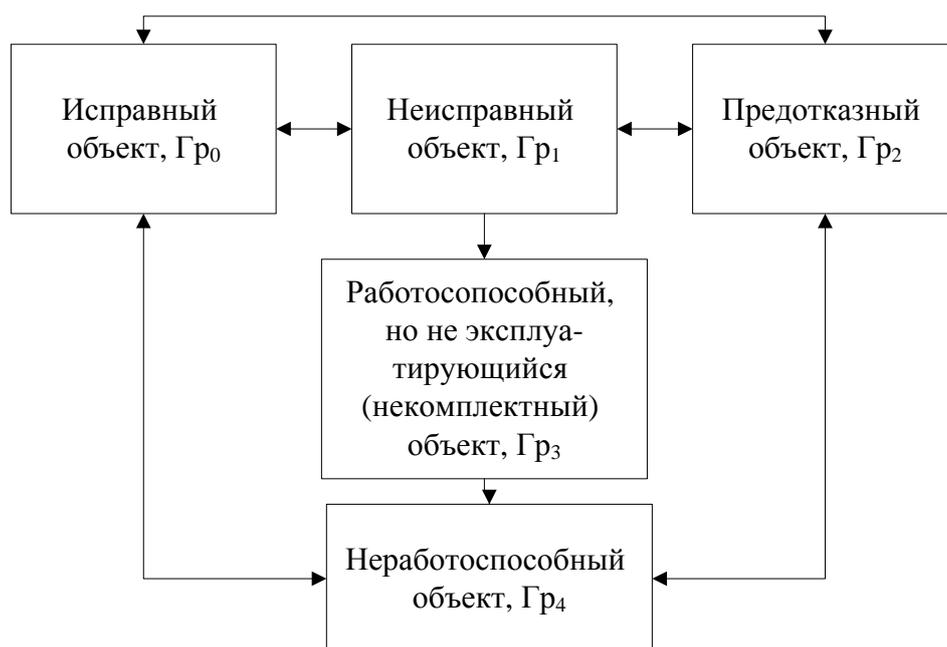


Рисунок 1 – Группировка транспортных средств по техническому состоянию и их взаимосвязь

При построении алгоритма следует исходить из того, что моменты возникновения повреждений и скорость развития дефектов и отказов в логистической инфраструктуре по сути являются случайными. Как следствие, время пребывания транспортного средства в том или ином состоянии перед переходом в следующее также является случайной величиной.

Построение алгоритма предполагает выделение признаков, по которым объект инфраструктуры будет отнесен к тому или иному классу. В качестве таковых следует рассматривать требования, определенные в СТО ОАО «РЖД», к данному типу объектов.

На основе статистики структурных подразделений ОАО РЖД формируется также матрица вероятностей, характеризующая динамику перехода транспортных средств из одного состояния в другое, т. е. наступления рискованного события (предотказного состояния) и отражающего необходимость реализации корректирующих и предупреждающих действий. Ухудшение состояния (т. е. переходы в состояния, характеризующиеся большей вероятностью отказов, чем текущее) происходит из-за возникновения повреждений и потока отказов технических средств [7]. Обратные переходы (улучшение состояния) происходят вследствие выполнения внеплановых ремонтных и обслуживающих работ. Случайность времени, проведенного транспортным средством в каком-либо состоянии до момента его улучшения, обу-

словлена неопределенностью состава и объема работ, а также квалификацией персонала, осуществляющего ремонт и эксплуатацию транспортных средств; продолжительности выполнения работ.

В этом случае первый этап алгоритма, связанный с определением класса объекта и перехода из одной группы в другую, будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

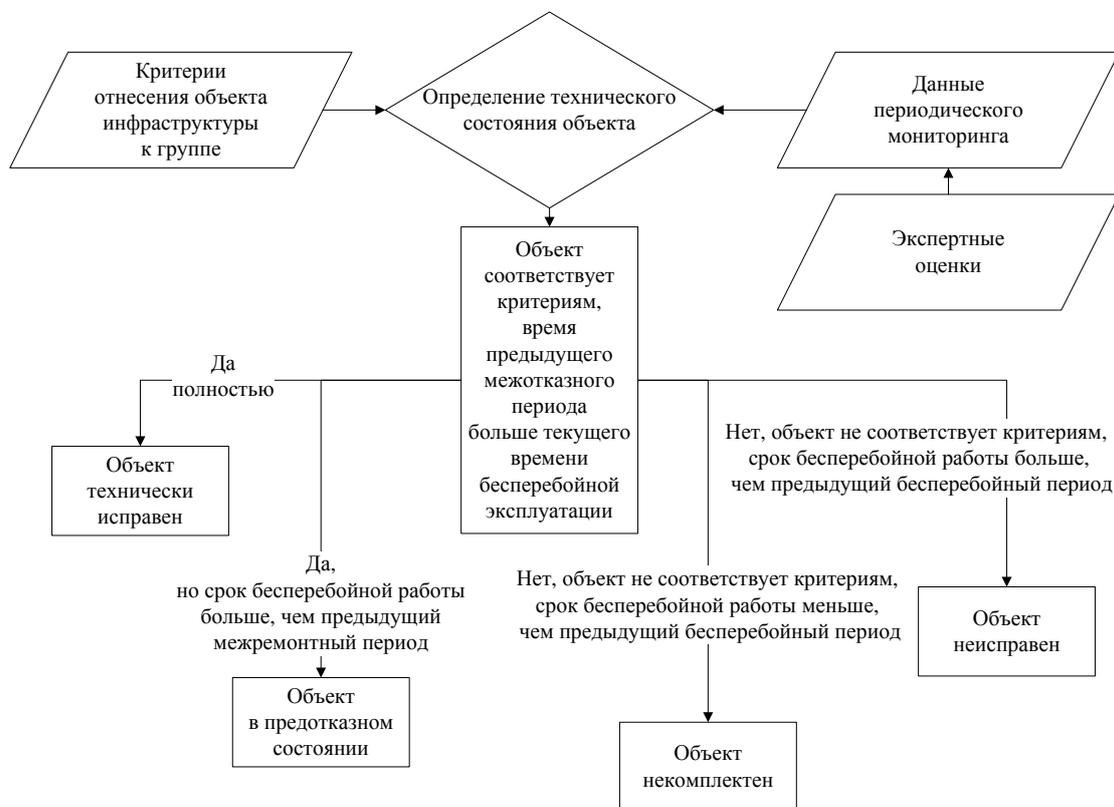


Рисунок 2 – Алгоритм выбора класса объекта

Изменение принадлежности объекта инфраструктуры к группе будет характеризовать наступление рискованного события, которое характеризуется изменением состояния объекта.

Представленный на рисунке 2 алгоритм выбора можно описать в виде последовательности действий следующим образом.

1. Сведения, характеризующие статистику отказов, определяются и упорядочиваются по возрастанию отметки времени, в которых возможно изменение состояния инфраструктуры. Этими отметками времени являются даты обнаружения и устранения дефектов, даты ввода и отмены ограничений по эксплуатации транспортного средства, даты обнаружения и устранения отказов [8].

2. Определяется перечень дефектов инфраструктуры, характеризующих уровень ее состояния на каждую отметку времени.

3. Для каждой отметки времени классифицируется состояние инфраструктуры (определяется, в каком из состояний от Γ_0 до Γ_2 оно находилось в данный момент). Если отметка времени соответствует вводу ограничений на эксплуатацию, то состояние классифицируется как s_3 . Если отметка времени соответствует запрету на эксплуатацию либо отказу технического средства, то как Γ_4 .

4. Определяются периоды непрерывного нахождения инфраструктуры в одном и том же состоянии (период времени T).

5. Оцениваются вероятности перехода в последующее состояние ($P_{\Gamma_j \Gamma_{j+1}}$), назначаются значения $p_{кр}$ для каждого уровня.

6. Регулярно производится сравнение текущих значений вероятности уровня с критическим значением.

В представленных действиях значение вероятности наступления i -го риска j -го уровня, которое приведет к переходу из состояния Γ_{r_j} в состояние $\Gamma_{r_{j+1}}$ (p_i), определяется так:

$$p_i = \frac{T_i}{T_{\text{пред}}}, \quad (2)$$

где T_i – время, прошедшее с момента отказа i -го узла объекта (объекта в целом);

$T_{\text{пред}}$ – время, прошедшее между двумя отказами i -го узла объекта (объекта в целом).

Значение вероятности рискового события следует рассматривать по формуле:

$$P_{\Gamma_{r_j}, \Gamma_{r_{j+1}}} = \sum p_i \cdot V_i, \quad (3)$$

V_i – значимость i -го риска j -го уровня;

p_i – доля проявления i -го риска в общем потоке отказов j -го уровня за период времени T .

В случае если $p_i \rightarrow 1$, можно достоверно ожидать перехода транспортного средства с одного уровня на другой (предотказное состояние), для предотвращения которого требуется проведение мероприятий по техническому обслуживанию [9].

Нужно отметить, что подобная модель оценки риска относительно хорошо будет работать в стабильных производственных и окружающих условиях и при идентичной интенсивности работы. Поэтому в модели выбора допускается использование экспертных оценок надежности транспортных средств, качества его эксплуатации и особенностей внешних условий.

Для каждого из транспортных средств задается экспертная оценка времени исходя из следующих вопросов.

1. Будучи исправным, через какое время в среднем
 - элемент откажет;
 - состояние элемента станет частично работоспособным (потребуется ограничения скорости);
 - состояние элемента станет неудовлетворительным;
 - состояние элемента станет удовлетворительным;
 - состояние элемента станет неисправным, но хорошим, т. е. появятся мелкие дефекты.
2. Как сократятся сроки переходов в худшие состояния, если текущее состояние
 - неисправное;
 - предотказное;
 - частично работоспособное (некомплектное) [10, 11].

Ответы на эти вопросы представляются в виде матрицы значений среднего времени T_{ij} , проводимого элементом в состоянии Γ_{r_i} до перехода в каждое из остальных возможных состояний (наступления рискового события). На основании ответов формируется индекс эксплуатации, который отражает особенности эксплуатации объекта инфраструктуры. Расчет ведется по формуле:

$$k_s = \prod \frac{T_i^{\text{экспл}}}{T_{\text{набл}}}, \quad (4)$$

где $T_i^{\text{экспл}}$ – эксплуатационное время отказов по параметрам, приведенным выше;

$T_{\text{набл}}$ – экспертно определяемое время по указанным параметрам.

Аналогично задаются поправочные коэффициенты, характеризующие изменение времени T_{ij} в зависимости от конструктивных особенностей, климатических воздействий и наступления непреодолимых рисковых событий. В случае если условия стандартны, значение коэффи-

циента, характеризующего воздействие, следует принять равным 1.

После этого итоговое значение $p_{ij}^{кон} = p_i \cdot k_s \cdot k_k \cdot k_p \cdot p_i^{кон}$ с учетом конструктивных, климатических и рисков условий эксплуатации рассчитывается по формуле:

$$p_{ij}^{кон} = p_i \cdot k_s \cdot k_k \cdot k_p \cdot p_i^{кон} \quad (5)$$

Получаемое значение сравнивается с критическим значением риска и параметрами эксплуатации. Алгоритм выбора решения представлен на рисунке 3.

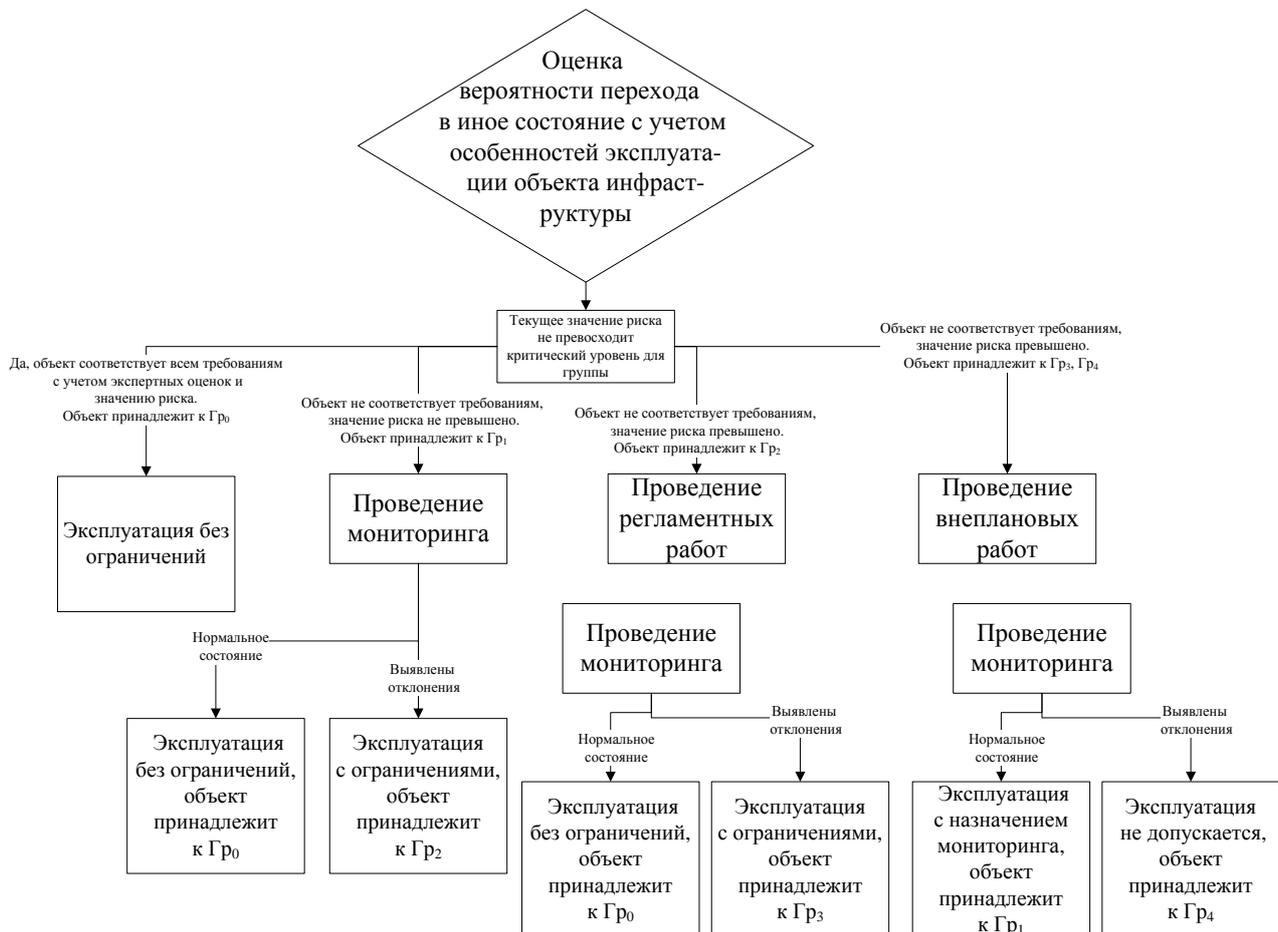


Рисунок 3 – Алгоритм принятия решения на основании сравнения значений рисков и параметров объекта

На основании данного алгоритма выбирается набор действий по профилактическим плановым и внеплановым мероприятиям, которые будут способствовать поддержанию логистической инфраструктуры в надлежащем техническом состоянии.

Для реализации предложенного алгоритма оценки рисков логистической инфраструктуры в ОАО «РЖД» необходимо произвести следующее.

1. Идентифицировать техническое состояние по объектам логистической инфраструктуры. Данный блок действий включает в себя идентификацию требований к оборудованию и площадям по видам перевозимых грузов и оценку соответствия существующей логистической инфраструктуры. При реализации действий по оценке технического состояния необходимо помнить о том, что структура перевозимых и перерабатываемых грузов может меняться, и, как следствие, могут меняться требования к техническому состоянию объектов логистической инфраструктуры.

2. Провести распределение объектов по классам объектов, разработать перечень дефектов, определяющих переход объектов из класса в класс. Наиболее перспективным вариантом представляется использование существующих перечней рисков, отраженных в соответствующих методиках.

3. На базе отчетности ОАО «РЖД» (по формам ЦОТС и ДОТС, определенным постановлением ОАО «РЖД» №1506р от 30.07.2012) провести анализ временных интервалов для определения вероятностей отказов.

4. Провести экспертную оценку конструктивных, технологических и рискованных условий эксплуатации по каждому объекту.

5. На основании итоговой оценки риска по объектам логистической инфраструктуры разработать план по проведению плановых и внеплановых регламентных работ для минимизации рисков логистической инфраструктуры.

Управление рисками в соответствии с представленным алгоритмом является систематическим действием, цель которого – обоснованный выбор мероприятий по поддержанию технического состояния инфраструктуры с учетом сроков ее эксплуатации и особенностей внешней среды. Использование данного алгоритма позволяет минимизировать затраты на проведение работ и тем самым снизить затраты на эксплуатацию.

Список литературы

1. ГОСТ 52806-2008. Менеджмент рисков [Текст]. – М.: Стандарты и качество, 2008. – 46 с.

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.

3. Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184 ФЗ от 27.12.2002 [Электронный ресурс]. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/

4. Распоряжение ОАО «РЖД» «Методические указания по оценке рисков искусственных сооружений» № 713/р от 09.04.2018 [Электронный ресурс]. <http://files.stroyinf.ru /Data/ 691/ 69179.pdf>

5. Распоряжение ОАО «РЖД» «Об утверждении типовых требований к системе менеджмента безопасности движения» № 983/р от 15.04.2015 [Электронный ресурс]. <http:// www. Consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=673340#03042765447906104>

6. Окрепилов В. В. Роль экономики качества в устойчивом социально-экономическом развитии России [Текст] / В. В. Окрепилов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития / Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области. – СПб. – 2015. – № 1 – 2 (46 – 47). – С. 41 – 51.

7. Окрепилов В. В. Многоуровневая система управления качеством как инструмент модернизации экономики России [Текст] / В. В. Окрепилов // Научно-технические ведомости СПбПУ / Санкт-Петербургский политехн. ун-т. – СПб. – 2014. – № 1 (187). – С. 9 – 19.

8. Попов, В. Г. Оценка риска от аварийных происшествий [Текст] / В. Г. Попов, Ф. И. Сухов, С. В. Петров // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2012. – № 6. – С. 150 – 155.

9. Зайцев А. А. Современная нормативная база обеспечения безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта [Текст] / А. А. Зайцев // Транспорт Российской Федерации / ООО «Пресса-Т». – М. – 2015. – № 5 (60). – С. 50 – 53.

10. Касьяненко, Т. Г. Анализ и оценка рисков в бизнесе: Учебник и практикум для академического бакалавриата [Текст] / Т. Г. Касьяненко. – М.: Юрайт, 2018. – 381 с.

11. Черненко, А. В. Управление конкурентоспособностью организаций на основе совершенствования мониторинга систем менеджмента качества [Текст] / А. В. Черненко // Известия Санкт-Петербургского гос. экон. ун-та / Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. – СПб. – 2016. – № 2 (98). – С. 142 – 146.

References

1. GOST 52806-2008. *Menedzhment riskov (Risk managment)*, Moscow, Standards and quality, 2008, 46 p.
2. GOST R ISO 9001-2015. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya (Quality management system. References)*, Moscow, Standartinform, 2015, 32 p.
3. *Federal'nyj zakon «O tekhnicheskomo regulirovanii» № 184 FZ ot 27.12.2002 (Federal Law About technical regulation)* Electronic resource http://www.consultant.ru/document/cons_LAW_40241/
4. *Rasporyazhenie OAO «RZHD» «Metodicheskie ukazaniya po ocenke riskov iskusstvennyh sooruzhenij» № 713/r ot 09.04.2018. (Guidelines for risk assessment of artificial structures)* Electronic resource <http://files.stroyinf.ru/Data/691/69179.pdf>
5. *Rasporyazhenie OAO «RZHD» «Ob utverzhdenii tipovyh trebovanij k sisteme menedzhmenta bezopasnosti dvizheniya» № 983/r ot 15.04.2015 (On approval of typical requirements for traffic safety management system)* Electronic resource <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=d oc &bas e=EXP&n=673340#0304276 5447906104>
6. Okrepilov V. V. The role of quality economics in the sustainable socio-economic development of Russia [Rol' ehkonomiki kachestva v ustojchivom social'no-ehkonomicheskom razvitii Rossii]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya*, 2015, no. 1 – 2 (46 – 47), pp. 41 – 51.
7. Okrepilov V. V. Multi-level quality management system as a tool for the modernization of the Russian economy [Mnogourovnevaya sistema upravleniya kachestvom kak instrument modernizacii ehkonomiki Rossii]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU*, 2014, no. 1 (187), pp. 9 – 19.
8. Popov, V. G. Accident Risk Assessment [Ocenka riska ot avariynyh proisshestvij] *Mir transporta*, 2012, no. 6, pp. 150 – 155.
9. Zajcev A. A. Modern regulatory framework for the safety of high-speed rail transport [Sovremennaya normativnaya baza obespecheniya bezopasnosti vysouoskorostnogo zheleznodorozhno transporta]. *Transport Rossijskoj Federacii*, 2015, no. 5 (60). pp. 50 – 53.
10. Kas'yanenko T. G. *Analiz i ocenka riskov v biznese: Uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata (Analysis and Risk Assessment in Business: Textbook and Workshop for Academic Baccalaureate)*. Moscow: Yurait, 2018, – 381 p.
11. Chernen'kij A. V. Managing the competitiveness of organizations through improved monitoring of quality management systems [Upravlenie konkurentosposobnost'yu organizacij na osnove sovershenstvovaniya monitoringa sistem menedzhmenta kachestva]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ehkonomicheskogo universiteta*, 2016, no. № 2 (98), pp. 142 – 146.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шендалев Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистика и управление качеством», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Shendalev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shendalev Alexander Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Economics Associate Professor of the department « Economic of transport, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Shendalev@mail.ru

Шендалева Ольга Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: OA_Shendaleva@mail.ru

Shendaleva Olga Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Computer science, mathematics and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: OA_Shendaleva@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шендалев, А. Н. Алгоритм оценки уровня рисков логистической инфраструктуры [Текст] / А. Н. Шендалев, О. А. Шендалева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 1 (37). – С. 141 – 150.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shendalev A. N., Shendaleva O. A. Algorithm for risk assessment of transport infrastructure. Journal of Transsib Railway Studies, 2019, vol. 1, no 37, pp. 141 – 150 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – Title of Journal, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 1 (37) 2019

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-71514 от 1 ноября 2017 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 29.04.2019.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 29.04.2019.

