

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛ

**ОСОБЕННОСТИ ЭНТРОПИЙНОЙ ОРГАНИЗОВАННОСТИ
ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ТИПИЧНЫХ МАРШРУТАХ
ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА**

**ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ
ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД**

**РЕЛЕЙНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КОММУТАЦИЯ ЦЕПЕЙ
В БЕЗОПАСНЫХ УСТРОЙСТВАХ СОПРЯЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ**

**РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО БОКОВОМУ ПУТИ
ДЛЯ ПОЛОГИХ МАРКОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С УЧЕТОМ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ**



23-25 СЕНТЯБРЯ

УФА 2020

📍 **ВДНХ ЭКСПО**

ТРАНСПОРТ

TRANSPORT OF THE URALS

V specialized Forum and Exhibition



V юбилейный
специализированный
форум и выставка
УРАЛА

ПОДДЕРЖКА:



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПРАВИТЕЛЬСТВО
РЕСПУБЛИКИ
БАШКОРТОСТАН



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
КОМИТЕТ РБ ПО ТРАНСПОРТУ
И ДОРОЖНОМУ ХОЗЯЙСТВУ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ТРАНСПОРТНАЯ
ДИРЕКЦИЯ РБ



БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ



www.uraltransexpo.ru



(347) 246-42-00, 246-42-29



avto@bvkeexpo.ru



[@transforumufa](https://www.instagram.com/transforumufa)



Транспортный форум

www.uraltransexpo.ru

#транспортныйфорум #транспортурала

TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Халибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Ташкент
13. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
14. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Tashkent
13. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
14. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

<i>А. И. Петров. Особенности энтропийной организованности перевозочного процесса на типичных маршрутах городского общественного транспорта</i>	3
<i>А. П. Буйносов, В. А. Васильев, А. В. Ерпалов, А. Ю. Ницкий, А. С. Баитов. Анализ электронного шума при вибродиагностике узлов моторвагонного подвижного состава</i>	10
<i>Г. Л. Аккерман, С. Г. Аккерман. Контрагенты в жизненном цикле линейных предприятий</i>	16

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

<i>А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, М. Ю. Капустин, О. В. Измеров, Д. Н. Шевченко, А. В. Самотканов. Проблемы развития тяговых приводов пассажирских электровозов с бесколлекторными ТЭД</i>	20
<i>Ю. В. Кривошея, Т. Л. Риполь-Сарагоси. Конструкторско-энергетические резервы улучшения эксплуатационных свойств железнодорожного фрикционного тормоза</i>	26

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

<i>А. Н. Ковкин. Релейно-полупроводниковая коммутация цепей в безопасных устройствах сопряжения на основе электромагнитных реле</i>	31
--	-----------

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Г. М. Волохов, Г. И. Гаджиметов. Об оценке сопротивления усталости конструкций грузовых вагонов скоростных поездов</i>	36
<i>Н. А. Битюцкий, В. В. Галов, Л. В. Цыганская, А. И. Бондаренко. Модернизация восьмьюосного вагона-цистерны для алкилбензолсульфокислоты с продлением срока службы</i>	41

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

<i>Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев, Н. С. Кочев, Л. Е. Осипов. Улучшение эксплуатационных показателей автомобильных двигателей внутреннего сгорания путем совершенствования термодинамики во впускной системе</i>	47
--	-----------

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский. Расчет скорости движения по боковому пути для пологих марок стрелочных переводов</i>	52
--	-----------

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

<i>А. С. Мазнев, А. А. Киселев, В. А. Усов, А. А. Калинина. Перспективы улучшения технико-экономических показателей электрического подвижного состава</i>	57
<i>А. В. Долгова, П. К. Шкодун. Применение аппарата нечеткой логики при разработке экспертных систем диагностирования тяговых электрических двигателей подвижного состава</i>	65
<i>В. В. Бублик, О. В. Гателюк, Н. В. Есин, В. А. Смирнов, О. Д. Юрасов. Анализ состояния существующего технологического процесса ремонта тяговых электродвигателей грузовых электровозов постоянного тока с помощью теории сетевого планирования и управления</i>	70

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

<i>Д. В. Лесников. Моделирование тяговой сети постоянного тока с учетом проводимости земли</i>	75
<i>А. С. Голубков, А. И. Слатин, А. Н. Смердин. Применение тепловизионных матриц низкого разрешения в системах контроля работоспособности токоприемников электроподвижного состава</i>	80
<i>В. В. Томилов, С. М. Утепбергенова, О. А. Сидоров. Математическая модель системы охлаждения полоза токоприемника в режиме движения магистрального электроподвижного состава</i>	86
<i>О. А. Лукьянова, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков. Совершенствование методов испытаний консолей контактной сети</i>	93
<i>А. А. Ковалев, А. В. Окунев, А. В. Микава, Н. В. Крапивин. Требования к оценке надежности поддерживающих конструкций несущего и контактного провода</i>	98

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

<i>A. I. Petrov. Features of entropy orderliness of transportation process for typical routes of urban public transport</i>	3
<i>A. P. Buynosov, V. A. Vasilyev, A. V. Erpalov, A. Yu. Nitskiy, A. S. Baitov. Analysis of electric noise at vibration based diagnostics of motor-coach stock assemblies</i>	10
<i>G. L. Akkerman, S. G. Akkerman. Counterparts in life cycle of linear enterprises</i>	16

ROLLING STOCK AND TRACTION

<i>A. S. Kosmodamianskiy, V. I. Vorobyev, M. Yu. Kapustin, O. V. Izmerov, D. N. Shevchenko, A. V. Samotkanov. Problems of development of traction drives with brushless traction motors for passenger electric locomotives</i>	20
<i>Yu. V. Krivosheya, T. L. Ripol-Saragosi. Construct and energy reserves improvement of exploitative properties rail friction brake</i>	26

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

<i>A. N. Kovkin. Relay-semiconductor circuit switching in safe interface units based on electromagnetic relays</i>	31
--	-----------

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

<i>G. M. Volokhov, G. I. Gadzhimetov. On assessment of fatigue strength of freight car structures for high-speed trains</i>	36
<i>N. A. Bityutskiy, V. V. Galov, L. V. Tsyganskaya, A. I. Bondarenko. Modernization of eight-axle tank car for alkylbenzenesulfonic acid with extension of service life</i>	41

MOTOR TRANSPORT

<i>L. V. Plotnikov, N. I. Grigoryev, N. S. Kochev, L. E. Osipov. Improvement of operational indicators of automobile internal combustion engines by development of thermodynamics in intake system</i>	47
--	-----------

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

<i>A. A. Loktev, V. V. Korolev, I. V. Shishkina, M. E. Berezovskiy. Calculation of the speed of movement on the side track for flat grades of switches</i>	52
--	-----------

ELECTRIC TRACTION

<i>A. S. Maznev, A. A. Kiselev, V. A. Usov, A. A. Kalinina. Prospects of improving technical and economic indicators of electric rolling stock</i>	57
<i>A. V. Dolgova, P. K. Shkodun. The use of fuzzy logic apparatus in development of expert systems for diagnosing traction electric motors of rolling stock</i>	65
<i>V. V. Bublik, O. V. Gatelyuk, N. V. Esin, V. A. Smirnov, O. D. Yurasov. Condition analysis of existing technological process for repair of electric traction motors of direct current freight locomotives with the use of theory of network planning and control</i>	70

ELECTRIC SUPPLY

<i>D. V. Lesnikov. Modeling of direct current traction power system with the consideration for earth conductivity</i>	75
<i>A. S. Golubkov, A. I. Slatin, A. N. Smerdin. Application of low-resolution thermal-imaging arrays in systems of performance monitoring of electric rolling stock current collectors</i>	80
<i>V. V. Tomilov, S. M. Utepbergenova, O. A. Sidorov. Pantograph cooling system mathematical model during motion of the railway electric transport</i>	86
<i>O. A. Lukyanova, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov. Development of methods for testing catenary cantilevers</i>	93
<i>A. A. Kovalev, A. V. Okunev, A. V. Mikava, N. V. Krapivin. Requirements to assessment of reliability of supporting constructions for bearing and contact wires</i>	98

УДК 656.132

Артур Игоревич Петров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия

ОСОБЕННОСТИ ЭНТРОПИЙНОЙ ОРГАНИЗОВАННОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ТИПИЧНЫХ МАРШРУТАХ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Artur Igorevich Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor, Exploitation of Automobile Transport Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia

Features of entropy orderliness of transportation process for typical routes of urban public transport

Аннотация

В статье представлены возможность, необходимость, идеология и суть энтропийного метода оценки организованности перевозочного процесса применительно к городскому общественному транспорту. Приведены примеры численного определения относительной энтропии перевозочного процесса на типичных маршрутах общественного транспорта. Показано, что уровень организованности перевозочного процесса, идентифицируемый относительной энтропией, определяется спецификой пространственного расположения маршрутов общественного транспорта в плане городской территории и в основном зависит от качественного состава пользователей услугами общественного транспорта.

Ключевые слова: городской общественный транспорт, специфика маршрутов городского общественного транспорта, организованность, энтропия, относительная энтропия, метод оценки.

Summary

The paper presents the possibility, necessity, ideology and essence of the entropy method of estimating the orderliness of the transportation process in relation to urban public transport. Examples of numerical definition of the relative entropy of the transportation process on typical public transport routes are given. The paper shows that the level of orderliness of the transportation process, identified by relative entropy, is determined by the specifics of the spatial location of public transport routes in terms of the urban area and mainly depends on the quality of users of public transport services.

Keywords: urban public transport, bus route specifics, orderliness, entropy, relative entropy, estimation method.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-3-9

ВВЕДЕНИЕ

Известное выражение классика американской литературы Г. Миллера «Хаосом мы называем порядок, который нам непонятен» образно описывает отношение человека к сложно структурируемому, но объективно существующим абстракциям. Человеческий опыт не всегда вмещает все многообразие форм бытия, и многие вещи люди склонны априори считать естественными и не поддающимися внешнему управлению. С другой стороны, диалектический закон единства и борьбы противоположностей говорит о том, что любой хаос является обратной стороной порядка или организованности материального мира.

Городской транспорт — одна из важнейших подсистем чрезвычайно сложной системы «город», пожалуй наиболее подверженная хаотическому и зачастую негативному влиянию внешней среды. Последние годы весьма продуктивно развивается направление цифрового моделирования функционирования транспортных систем городов [1], но здесь успехи неочевидны. Слишком много непостоянных во времени и пространстве вводных, слишком высока скорость их динамики. И это определяет в конечном счете весьма низкую адекватность транспортных моделей и результатов их использования для решения практических задач. Зависит это в первую очередь от недоучета уровня организованности транспортных процессов, организованности транспортных систем. Уже давно известен, хотя и достаточно ограниченно применяется на практике (во всяком случае, на транспорте), метод энтропийного моделирования динамических процессов [2, 3]. Функционирование транспортной системы страны, региона или города, несомненно, является динамическим процессом, для которого хаос и все его проявления — одни из обязательных атрибутов.

В рамках данной статьи делается попытка представить возможности использования энтропийного метода оценки организованности перевозочного процесса применительно к городскому общественному транспорту (ГОТ).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что **метод** (от греч. *methodos* — теория, учение) — это способ решения конкретной задачи, достижения какой-либо цели. Иногда под методом понимают совокупность приемов или операций познания объективной реальности. Под **организованностью в сфере ГОТ** обычно понимается некое свойство транспортно-технологической системы города, специализирующейся на перемещении людей в пространстве, идентифицирующее результат практической реализации управленческих решений, направленных на структуризацию системы (например, перевозок на маршруте) и ограничивающих свободу ее изменений. Если проще, то организованность можно понимать и как некий набор управленческих решений, способствующих снижению уровня хаоса в системе «городской общественный транспорт», что снижает вероятность проявления конфликтов всех видов в системе «пассажир — перевозчик — организатор перевозок — внешняя среда».

Чем выше организованность, тем ниже уровень хаоса в системе, количественно оцениваемый относительной энтропией H_n , и наоборот. Вышесказанное позволяет сформулировать цель исследования — необходимо идентифицировать относительную энтропию H_n в отношении процессов функционирования ГОТ, установить закономерности ее изменения во времени и пространстве и дать рекомендации по повышению организованности перевозочного процесса на маршрутах ГОТ. Для достижения заявленной цели потребуются решить ряд задач:

адаптировать методику информационной энтропии К. Шеннона [4–6] под решение поставленной задачи;

собрать, проанализировать экспериментальную информацию, характеризующую организованность перевозочного процесса ГОТ;

количественно оценить относительную энтропию H_n для заданных условий;

найти пространственно-временные закономерности формирования относительной энтропии H_n применительно к типичным по признаку расположения трассы маршрутам на плане городской территории;

рассмотреть решение заявленных задач на примере показательных маршрутов ГОТ Тюмени.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Базовыми работами, послужившими фундаментальной основой оценки информационной энтропии для всех последующих, были труды К. Шеннона [4–6]. Научно-практическое наполнение и конкретные методики оценки информационной энтропии человеко-технических систем применительно к вопросам формирования безопасности дорожного движения ранее рассмотрены в работах [7, 8]. Руководствуясь этими наработками, отмечу, что прежде всего необходимо структурировать причинно-следственный механизм формирования результатов функционирования ГОТ. Этот механизм можно рассматривать как цепочку этапов производственно-технологического процесса [7, 8], в ходе которого передается (и, что неудивительно, количественно трансформируется) прежде всего информация, характеризующая изучаемый транспортный процесс. Набор этапов причинно-следственного механизма формирования результатов функционирования ГОТ может быть весьма различным в зависимости от целевого направления постановки задачи. Например, на рис. 1 представлена цепочка этапов формирования результата функционирования ГОТ с позиций эффективности перевозочного процесса.

Суть этой схемы — в наглядном представлении тех информационных потерь, которые неизбежно формируются этап за этапом. В данном случае под потерями можно понимать некое пропорциональное снижение количества транспортной продукции (объемов перевозок пассажиров) на каждом последующем этапе процесса информационной трансформации, связанное с тем самым влиянием множества факторов внешней среды, задающей некий уровень хаоса функционирования транспортной системы.

На каждом следующем этапе процесса информационной трансформации формируются понижающие коэффициенты K_i , характеризующие относительное снижение числа жителей города, подпадающих под информационное наполнение каждого из блоков цепочки. Например, из 1,5 млн обязательных суточных транспортных передвижений жителей Тюмени лишь около 300–400 тыс. приходится на ГОТ; из этого числа 1,5–30 тыс. перевозится за сутки на конкретных различных городских маршрутах; при этом удельно на рейс приходится 10–80 перевезенных пассажиров (на разных маршрутах); из

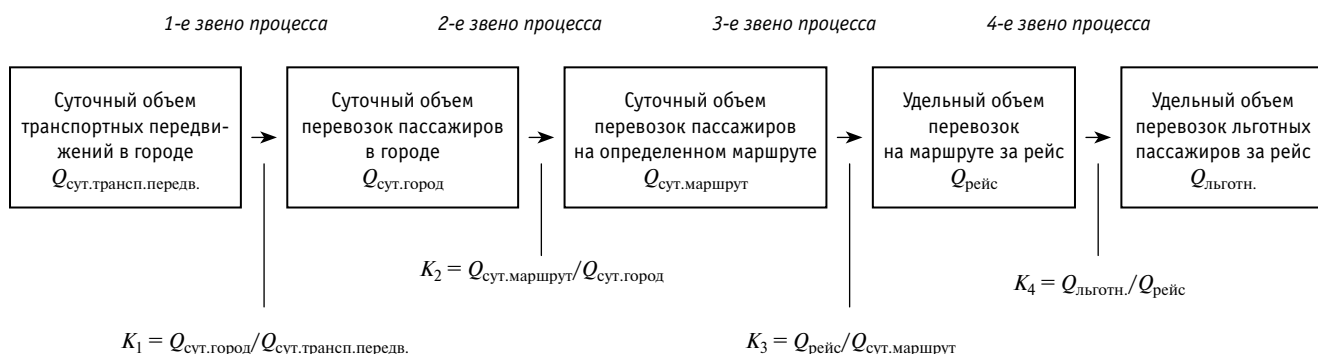


Рис. 1. Четырехзвенный процесс информационной трансформации в ходе перевозок пассажиров (с позиций управления эффективностью пассажирских перевозок)

этого числа на долю льготников приходится 6–32 пассажира. Как легко можно заметить, каждый последующий блок причинно-следственной цепочки является понижающим звеном по отношению к предыдущему. Важно отметить и то, что при анализе заявленной трансформации данных об объемах перевозок основное внимание уделяется не внутреннему механизму, протекающему в каждом компоненте причинно-следственной цепочки, а коэффициентам информационной передачи K_i между ее звеньями (см. рис. 1).

Данные коэффициенты являются средством последующей оценки весомости конкретного этапа технологического процесса в формировании его итогового результата. Применительно к процессам перевозок пассажиров речь идет об идентификации значимости и ее количественной оценке отдельных звеньев процесса. Итоговый результат перевозочного процесса ГОТ определяется по уравнению

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \ln(K_1) + \ln(K_2) + \ln(K_3) + \ln(K_4) \quad (1)$$

и может быть приравнен к 1 для последующего определения весовых коэффициентов w_i .

Весовые коэффициенты w_i для каждого звена исследуемого процесса определяются из соотношения

$$w_i = \frac{\ln(K_i)}{\sum_{i=1}^4 \ln(K_i)} \quad (2)$$

Информационная энтропия оценивается [4–6] как

$$H = - \sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln w_i, \quad (3)$$

где n — число звеньев процесса информационной трансформации;

w_i — вес значимости звена (весовой коэффициент) процесса информацион-

ной трансформации $\left(\sum_{i=1}^n w_i = 1 \right)$.

Так как энтропия — функционал (т.е. число, зависящее от функции), характеризующий структурное состояние системно-

го процесса, то для удобства принято использовать относительную энтропию Hn :

$$Hn = H/H_{\max} = H/\ln(4). \quad (4)$$

ЭТАПНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ, ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ Hn

Заявленная задача решалась в два этапа. На первом из них рассматривались вопросы изучения изменения относительной энтропии перевозочного процесса Hn на конкретном маршруте ГОТ во времени. На втором изучались особенности формирования относительной энтропии перевозочного процесса Hn (с учетом особенностей маршрутов ГОТ, обслуживающих различные районы города) во времени и пространстве. В качестве примера решения задачи изучения изменения относительной энтропии перевозочного процесса Hn во времени рассмотрим четыре типичных (по признаку конфигурации расположения в плане городской террито-

рии) маршрута ГОТ Тюмени. Группу диаметральных маршрутов представляет маршрут № 1 (рис. 2), группу радиальных — маршрут № 4 (рис. 3), группу тангенциальных — маршрут № 53 (рис. 4), группу кольцевых и комплексных (смешанных) — маршрут № 13 (рис. 5).

Для каждого из рассматриваемых маршрутов была собрана информация, необходимая для расчета (см. рис. 1) искомой относительной энтропии Hn перевозочного процесса на маршрутах ГОТ. В табл. 1 приведен пример расчета Hn по месяцам 2017–2019 гг. для маршрута № 1. Основой данных была информация Департамента дорожной инфраструктуры и транспорта Тюмени.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ Hn ВО ВРЕМЕНИ

Заявленная задача решалась дискретно по месячным данным. На рис. 6 представлены графические изображения зависимостей $Hn = f(\text{время})$, соответствующие маршрутам № 1, 4, 53 и 13 ГОТ Тюмени.

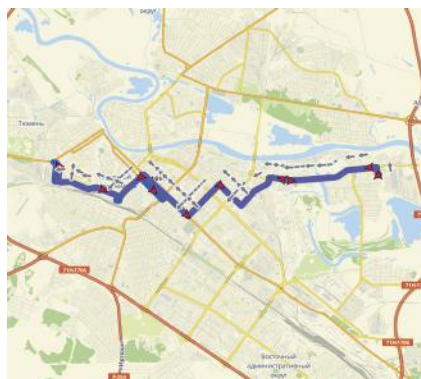


Рис. 2. Маршрут № 1 (диааметральный)

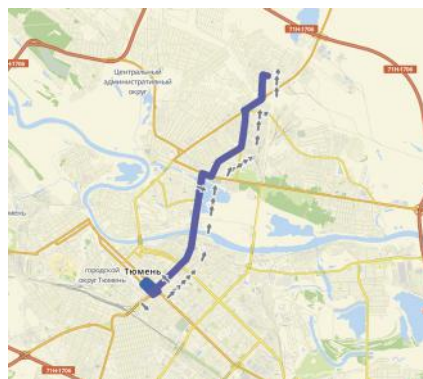


Рис. 3. Маршрут № 4 (радиальный)

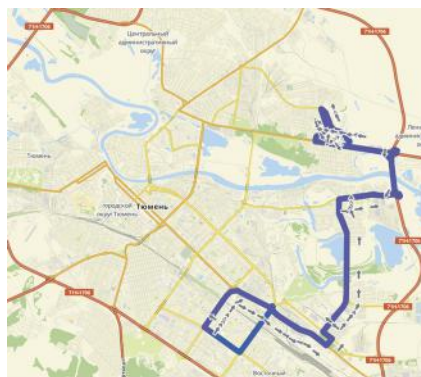


Рис. 4. Маршрут № 53 (тангенциальный)

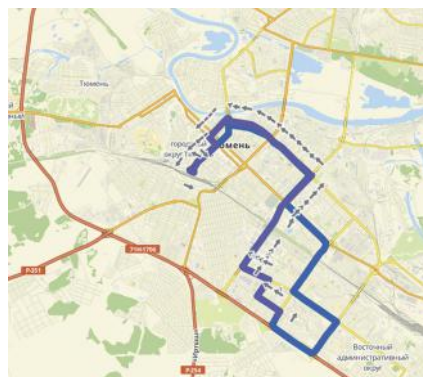


Рис. 5. Маршрут № 13 (кольцевой)

Таблица 1

Исходные данные (2017–2019 гг.) для анализа динамики организованности перевозочного процесса на маршруте № 1 ГОТ Тюмени и результаты расчета помесечных значений относительной энтропии H_n

Месяц	Расчетная суточная транспортная подвижность населения, поездок в день	Суточный объем перевозок пассажиров в городе $Q_{\text{сут.город}}$ пасс./сут	Суточный объем перевозок на маршруте № 1 $Q_{\text{сут. маршрут}}$ пасс./сут	Удельный объем перевозок за рейс на маршруте № 1 Q_p пасс./рейс	Удельный объем перевозок льготников на маршруте № 1 за рейс $Q_{\text{рейс}}$	Значения относительной энтропии H_n для перевозочного процесса
2017 г.						
Январь	1489108	318515,2	9892,0	44,3	18,5	0,8549
Февраль	1493764	374798,4	10904,2	46,7	20,3	0,8409
Март	1496036	415944,3	11818,6	49,3	21,9	0,8318
Апрель	1501104	417089,8	11250,3	47,8	20,5	0,8354
Май	1504938	410882,5	9648,7	55,4	24,0	0,8435
Июнь	1512028	379479,1	9445,0	52,7	20,4	0,8579
Июль	1516518	342239,3	8862,1	49,8	18,0	0,8697
Август	1522030	350470,0	9016,3	49,6	18,1	0,8675
Сентябрь	1525228	405318,4	9672,8	53,8	22,7	0,8468
Октябрь	1527984	424254,4	10193,0	55,7	24,4	0,8402
Ноябрь	1530854	416332,4	10780,8	46,3	20,6	0,8335
Декабрь	1534400	411066,7	10318,4	46,4	20,7	0,8357
2018 г.						
Январь	1536716	341048,3	8853,3	43,0	18,4	0,8526
Февраль	1540030	404807,2	9504,4	44,0	19,5	0,8380
Март	1543636	404278,3	9671,0	45,4	20,0	0,8390
Апрель	1547228	427253,0	9901,6	46,6	21,2	0,8327
Май	1552024	420516,4	8921,1	51,9	22,7	0,8426
Июнь	1556236	392549,1	8392,6	48,3	19,0	0,8564
Июль	1561626	358483,3	7566,7	42,9	15,0	0,8703
Август	1564918	351453,8	7883,9	44,1	16,3	0,8674
Сентябрь	1567970	427433,1	8352,3	48,8	20,9	0,8439
Октябрь	1570004	449803,1	8780,8	49,8	22,3	0,8359
Ноябрь	1571830	430777,1	9061,2	43,6	19,8	0,8336
Декабрь	1574674	412901,0	8801,0	42,7	19,1	0,8380
2019 г.						
Январь	1577332	350799,1	7687,9	38,6	17,1	0,8497
Февраль	1578624	406053,0	8833,4	46,7	21,2	0,8400
Март	1579686	424960,5	9145,4	44,3	20,4	0,8335
Апрель	1580652	455585,2	9313,2	46,9	22,1	0,8276
Май	1581984	419403,5	7960,3	48,8	22,0	0,8419
Июнь	1582028	396075,3	7742,8	48,2	19,4	0,8558
Июль	1583116	363102,1	7374,5	46,8	17,2	0,8689
Август	1584624	365617,4	7121,5	46,6	17,7	0,8665
Сентябрь	1585758	430971,0	7632,8	52,0	23,2	0,8432
Октябрь	1586536	457526,8	8103,0	52,1	21,2	0,8463
Ноябрь	1587788	431043,2	7894,3	46,8	21,8	0,8359
Декабрь	1588432	435841,7	7889,7	46,2	21,8	0,8338

Анализ временных рядов значений относительной энтропии H_n перевозочного процесса на типичных маршрутах ГОТ Тюмени позволяет отметить, что в динамике этого процесса присутствует ярко выраженная цикличность, связанная с сезонностью. В летнее время (особенно в июле–августе)

относительная энтропия H_n перевозочного процесса увеличивается до максимальных значений, в межсезонье (апрель, октябрь) H_n снижается до минимумов. Аналогичные закономерности, построенные для двух десятков маршрутов ГОТ Тюмени, также цикличны (с ростом H_n в летний период и снижением

Hn в межсезонье). Между тем сравнение зависимостей $Hn = f(\text{время})$ для различных маршрутов (см. рис. 6а, б, в, г) показывает различия в диапазоне и амплитуде изменения Hn . Предположительно определенные различия между частными зависимостями $Hn = f(\text{время})$, построенными для разных маршрутов, определяются особенностями расположения трассы маршрута в пространстве городской территории. А эти особенности, в свою очередь, формируются с учетом ощутимого влияния какого-то значимого фактора, косвенно выраженного в рамках четырехзвенного процесса информационной трансформации (см. рис. 1).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ Hn В ПРОСТРАНСТВЕ

К настоящему моменту расчеты значений Hn осуществлены более чем для двух десятков маршрутов ГОТ Тюмени. Полученные данные позволяют классифицировать маршруты по признаку соответствия Hn различным типам маршрутов (табл. 2). Кроме того, попытка выявить определяющий признак различия величины Hn показала, что этим признаком является доля льготников в общем объеме перевозок.

Осмысление данного факта привело автора к следующим выводам.

1. Радиальные маршруты чаще всего связывают центр города со спальными микрорайонами, преимущественный контингент которых — сравнительно небогатые люди, и среди них достаточно много лиц, имеющих льготы на оплату проезда. При этом коэффициент сменности пассажиров по длине маршрута редко превышает $\eta_{\text{см}} \leq 1,3-1,6$. Исследования показали, что состав пользователей услуг таких маршрутов относительно стабилен и в основном это небогатые бюджетники, отличающиеся наличием постоянного места работы и ярко выраженной привычкой пользоваться услугами ГОТ устойчиво — минимум пять дней в неделю из расчета две поездки в день.

2. Диаметральные маршруты принципиально отличаются от радиальных существенно большим значением маршрутного коэффициента сменности ($\eta_{\text{см}} \approx 4-10$). Их нельзя рассматривать как простую сумму двух радиальных маршрутов по самым разным причинам.

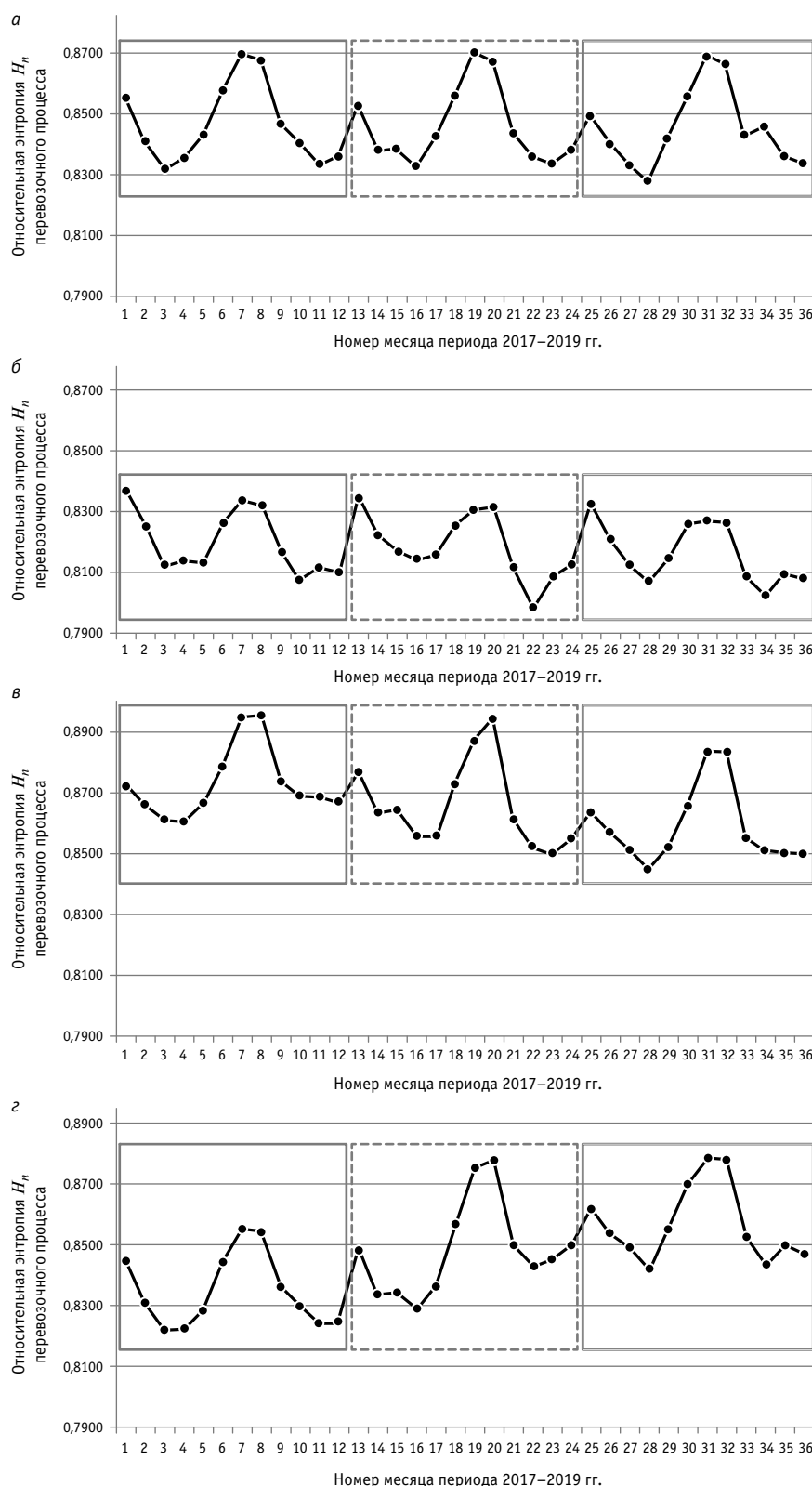


Рис. 6. Графические изображения зависимостей $Hn = f(\text{время})$ для типичных маршрутов ГОТ:

а — маршрут № 1 (диаметральный); б — маршрут № 4 (радиальный);
в — маршрут № 53 (тангенциальный); г — маршрут № 13 (кольцевой)

Таблица 2

Типичные значения относительной энтропии перевозочного процесса Hn , характерные для маршрутов разных типов

Диапазоны значений Hn для различных типов маршрутов			
Радиальный	Диаметральный	Кольцевой	Тангенциальный
0,770–0,840	0,820–0,875	0,820–0,880	0,840–0,905
$\Delta Hn = 0,070$	$\Delta Hn = 0,055$	$\Delta Hn = 0,060$	$\Delta Hn = 0,065$
Определяющий признак различия величины Hn			
Относительно высокая доля льготников в объеме перевозок (около 0,46–0,58)	Доля льготников в объеме перевозок на среднем уровне (около 0,35–0,45)	Доля льготников в объеме перевозок на среднем уровне (около 0,35–0,45)	Относительно низкая доля льготников в объеме перевозок (около 0,20–0,32)

Например, основная из них — непостоянство состава пользователей услуг ГОТ. Здесь нет той стабильности состава пассажиров одного маршрута или даже автобуса конкретного расписания.

3. Кольцевые маршруты близки по характеристикам Hn к диаметральным. Для них также характерен относительно непостоянный состав пользователей.

4. Тангенциальные маршруты характеризуются максимальными значениями Hn , что легко объяснимо их функциональным назначением. Именно для таких маршрутов характерна крайне низкая эффективность и нестабильный пассажиропоток, во многом зависящий, например, от погоды и других незначимых факторов для пассажиров с целевыми рабочими поездками. Однако таких пассажиров среди пользователей тангенциальных маршрутов совсем немного, что можно легко заметить по доле пассажиров-льготников.

Таким образом, надо отметить, что максимальная организованность с позиций структуры перевозочного процесса (а значит, минимальные значения Hn) характерна для радиальных маршрутов, связывающих так называемые спальные микрорайоны города с его центром и обеспечивающих относительно небогатых жителей города именно транспортной услугой с трудовой целью. Для этих маршрутов характерна высокая доля пассажиров-льготников, а доля льготных поездок часто превышает 50 %.

Значительно более низкий уровень организованности перевозочного процесса (а следовательно, максимальные значения Hn) характерен для тангенциальных маршрутов ГОТ, функционал которых выражен существенно в меньшей степени, чем у диаметральных и кольцевых и в особенности у радиальных.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью формализации вышеозвученных наблюдений была построена комплексная зависимость $Hn = f(\text{доля льготников})$, состоящая из трех частей, соответствующих трем маршрутам ГОТ Тюмени (рис. 7). Диапазон значений $[0,21–0,32]$ заполнен данными по маршруту № 53; диапазон значений $[0,33–0,47]$ — данными по маршруту № 13; диапазон значений $[0,48–0,57]$ — данными по маршруту № 4.

Таким образом, существует сильная статистическая связь ($R^2 = 0,856$) между долей пассажиров, имеющих право на льготный проезд, и организованностью перевозочного процесса ГОТ. Размышления о причинах этого приводят к выводу о зна-

чительно меньшей хаотичности перевозочного процесса ГОТ при относительно большой в общем объеме перевозок доле пассажиров-льготников. Именно это звено трансформационного механизма «обязательные суточные транспортные передвижения — суточные объемы перевозок на конкретных различных городских маршрутах — удельные рейсовые объемы перевозок — удельные рейсовые объемы перевозок пассажиров-льготников» играет важнейшую роль в формировании организованности перевозочного процесса на маршрутах ГОТ.

Другой важный момент, связанный с дифференциацией уровней организованности перевозочного процесса в зависимости от типа маршрута, также имеет отношение к качественному составу перевозимых пассажиров. Пользователи услуг радиальных маршрутов — преимущественно постоянные клиенты, и уровень организованности перевозочного процесса на таких маршрутах выше. Для диаметральных, кольцевых и особенно тангенциальных маршрутов выше уровень хаотичности итогового перевозочного результата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Одна из важнейших задач департаментов организации транспортного обслуживания населения муниципалитетов и служб эксплуатации организаций-перевозчиков в российских городах

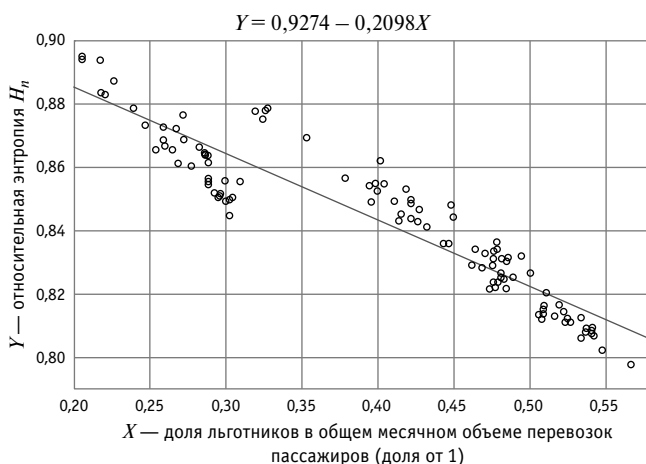


Рис. 7. Графическое изображение комплексной зависимости $Hn = f(\text{доля льготников})$ для всего диапазона значений доли льготников в общем объеме перевозок пассажиров

заключается в определении тех рациональных режимов работы транспорта, которые позволяют оптимизировать балансное соотношение «спрос — предложение». Это в конечном счете позволяет снизить эксплуатационные затраты перевозчиков и одновременно улучшить качество транспортного обслуживания жителей города. Обычно в большинстве городов России эта задача решается эмпирическим способом — с использованием метода проб и ошибок. Идентификация уровня организованности перевозочного процесса позволяет, во-первых, количественно оценить фактическое состояние коэффициента полезного действия в сфере транспортирования пассажиров, а во-вторых, понять, что расширение круга пассажиров-льготников значительно снижает уровень хаотичности функционирования транспортной системы. Возможно, этот вывод кажется весьма радикальным, однако при ближайшем рассмотрении оказывается основой для вполне рациональных управленческих решений. Например, расширение доли льготников позволяет повысить объемы перевозок ГОТ, а значит, перенести акценты в развитии городской транспортной системы с идеологии индивидуальной автомобилизации (ИАТ), не оправдавшей себя в большинстве стран мира с невысоким уровнем удель-

ного ВВП [9], на подходы приоритетного развития ГОТ. А этот путь возможен, скорее всего, при добровольном согласии любителей поездок на личных автомобилях пересесть в автобусы и другие виды общественного транспорта. При этом те гигантские средства, которые сегодня преимущественно тратятся на развитие инфраструктуры ИАТ, не дают ощутимой отдачи [10]. Перенаправление хотя бы части из них на развитие ГОТ позволило бы не только количественно и качественно улучшить ГОТ, но и перевести большую часть пассажиров, если не всех, в категорию льготников. Такой путь развития городских транспортных систем в свое время рассматривался в СССР как возможный еще в 1970-х — начале 1980-х гг. [11], но затем был признан нецелесообразным по экономическим причинам. Возможно, сегодня снова наступает то время, когда этот вариант развития системы транспортного обслуживания городских жителей становится не только допустимым, но и единственно правильным с позиций необходимости повышения организованности транспортного процесса.

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 0825–2020–0014 (2020–2022 гг.).

Литература

1. Официальный сайт партнера PTV-group в России компании SIMETRA. URL: <https://ptv-vision.ru/> (дата обращения: 14.04.2020).
2. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. Москва : Наука, 1978. 248 с.
3. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике : монография. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 202 с.
4. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. N. Y., 1993. Pp. 8–111.
5. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. IRE. 1949. Vol. 37. No. 10.
6. Shannon C. E. Communication Theory of Secrecy Systems. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. N. Y., 1993. Pp. 112–195.
7. Петров А. И., Евтюков С. А., Колесов В. И. Новые подходы к управлению безопасностью дорожного движения: парадигма организованности процессов обеспечения безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 65–74. ISSN 2073–7432.
8. Петров А. И. К вопросу о важности энтропийного анализа в оценке качества управления безопасностью дорожного движения на федеральном уровне // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 8. С. 116–126. ISSN 2077–7175.
9. Аджемоглу Д., Робинсон Дж. А. Почему одни страны богатые, а другие бедные. Происхождение власти, процветания и нищеты. Москва : Изд-во АСТ, 2015. 693 с.
10. Вандербильт Т. Трафик. Психология поведения на дорогах. Москва : Манн, Иванов и Фарбер ; Эксмо, 2013. 432 с.
11. Ануреев С. В. Столкновение теорий бюджетного субсидирования, платных государственных услуг и фискальной монополии (на примере Московского метрополитена и в контексте мирового опыта) // Бухгалтерский учет в бюджетных и некоммерческих организациях. 2020. № 4 (484). С. 13–38. ISSN 2079–6714.

References

1. Official web-site of SIMETRA company, the PTV-group partner in Russia [Ofitsial'nyy sayt partnera PTV-group v Rossii kompanii SIMETRA]. URL: <https://ptv-vision.ru/> (access date: 14.04.2020).
2. Wilson A. G. Entropy in urban and regional modelling [Entropiynye metody modelirovaniya slozhnykh sistem]. Moscow : Science, 1978. 248 p.
3. Tsvetkov O. V. Entropy analysis of data in physics, biology and engineering [Entropiynnyy analiz dannykh v fizike, biologii i tekhnike] : monograph. St. Petersburg : Publishing House of ETU «LETI», 2015. 202 p.
4. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. N. Y., 1993. Pp. 8–111.
5. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. IRE. 1949. Vol. 37. No. 10.
6. Shannon C. E. Communication Theory of Secrecy Systems. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. N. Y., 1993. Pp. 112–195.
7. Petrov A. I., Evtyukov S. A., Kolesov V. I. New approaches to safety management road traffic: paradigm organization processes for ensuring road safety [Novye podkhody k upravleniyu bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya: paradigma organizovannosti protsessov obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya] // Transport and Technological Cars. 2019. No. 3 (66). Pp. 65–74. ISSN 2073–7432.
8. Petrov A. I. On the importance of entropy analysis in assessing the quality of road safety management at the federal level [K voprosu o vazhnosti entropiynogo analiza v otsenke kachestva upravleniya bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya na federal'nom urovne] // Intellect. Innovation. Investments. 2019. No. 8. Pp. 116–126. ISSN 2077–7175.
9. Acemoglu D., Robinson J. A. Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty [Pochemu odni strany bogaty, a drugie bednye. Proiskhozhdenie vlasti, protsvetaniya i nishhety]. Moscow : Publishing House ACT, 2015. 693 p.
10. Vanderbilt T. Traffic: Why We Drive the Way We Do (and What It Says About Us) [Trafik. Psikhologiya povedeniya na dorogakh]. Moscow : MIF ; Eksmo, 2013. 432 p.
11. Anureev S. V. Collision of theories of budget financing, paid state services and fiscal monopoly (on example of the Moscow Metro and in context of world experience) [Stolknovenie teorii byudzhethnogo subsidirovaniya, platnykh gosudarstvennykh uslug i fiskal'noy monopolii (na primere Moskovskogo metropolitena i v kontekste mirovogo opyta)] // Accounting in budget and nonprofit organizations. 2020. No. 4 (484). Pp. 13–38. ISSN 2079–6714.

УДК 629.423.2:629.05

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Виталий Альбертович Васильев, кандидат технических наук, директор Научно-технического центра разработки систем контроля и диагностики «СИГМА», Челябинск, Россия,

Алексей Викторович Ерпалов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия,

Антон Юрьевич Ницкий, кандидат технических наук, технический директор Научно-исследовательского центра «Суперкомпьютерные технологии и открытое программное обеспечение», Челябинск, Россия,

Александр Сергеевич Байтов, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОГО ШУМА ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИКЕ УЗЛОВ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Vitaliy Albertovich Vasilyev, PhD in Engineering, Director of Scientific and Technical Centre of Development of Systems for Monitoring and Diagnostics «SIGMA», Chelyabinsk, Russia,

Alexey Viktorovich Erpalov, PhD in Engineering, Associate Professor, Flying Vehicles Department, South Ural State University (National Research University), SUSU, Chelyabinsk, Russia,

Anton Yuryevich Nitskiy, PhD in Engineering, Technical Director of Research and Development Centre «Supercomputer Technologies and Open Software», Chelyabinsk, Russia,

Alexander Sergeevich Baitov, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Analysis of electric noise at vibration based diagnostics of motor-coach stock assemblies

Аннотация

Широкий динамический и частотный диапазоны, малый уровень шума позволяют использовать пьезоакселерометры в качестве универсальных датчиков контроля и диагностики вибрационного состояния узлов перспективного моторвагонного подвижного состава. Электронный шум канала измерения вибропараметров зависит не только от шума непосредственно чувствительного элемента, пьезокристалла или МЭМС-акселерометра, но и от дальнейшей обработки сигнала, в первую очередь от работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В статье дан сравнительный анализ уровня электронного шума канала измерения вибропараметров для пьезо- и МЭМС-акселерометров с учетом влияния аналого-цифрового преобразователя. Сделан вывод, что лучшими АЦП для измерения вибропараметров можно считать 12- и 16-разрядный.

Ключевые слова: виброконтроль, пьезоакселерометр, МЭМС-акселерометр, электронный шум, плотность шума, цифровая трансформация, моторвагонный подвижной состав, датчик, анализ.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-10-15

Summary

Wide dynamic and frequency ranges, low level of noise allow using piezoelectric accelerometers as general purpose sensors for monitoring and diagnostics of vibration condition of assemblies of prospective motive-coach stock. Electric noise of a vibration parameters measuring channel depends not only on noise from the detecting element, but also on the further processing of a signal, first of all on the operation of an analog-to-digital converter (ADC). The paper considers a comparative analysis of electric noise level of the vibration parameters measuring channel for piezoelectric and MEMS-accelerometers with the consideration for the influence of the ADC. As a result, the best ADCs for measuring vibration parameters are 12-digit and 16-digit ones.

Keywords: vibration monitoring, piezoelectric accelerometer, MEMS-accelerometer, electric noise, noise density, digital transformation, motor-coach stock, sensor, analysis.

К числу направлений цифровой трансформации относится создание инструментов интеллектуального управления движением, цифрового моделирования, мониторинга транспортных средств и объектов инфраструктуры, которое представлено в перечне технологий, разрабатываемых на базе цифровых сервисов. Этот перечень включен в долгосрочную программу развития ОАО «РЖД» до 2025 г. Перспективные требования, предъявляемые к моторвагонному подвижному составу (МВПС) будущего, неразрывно связаны с концепцией цифровой железной дороги, согласно которой подвижной состав рассматривается как объект в системе управления перевозочным процессом. Поэтому реализация концепции «умный поезд» должна начинаться уже на стадии проектирования и учитывать ряд принципов построения. Для МВПС это наличие микропроцессорной системы управления и диагностики с интегрированным комплексным локомотивным устройством безопасности.

Одни из основных узлов, определяющих надежность и ресурс тягового подвижного состава, — колесно-моторные блоки, состоящие из тяговых электродвигателей, колесных пар, зубчатых передач и муфт. В свою очередь, важное значение имеют техническое состояние и безотказная работа подшипниковых узлов как тяговых электродвигателей, так и колесных пар.

В настоящее время в ОАО «РЖД» применяется планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Техническое состояние узлов и деталей, подшипниковых узлов МВПС соответственно периодически контролируется вибродиагностическими комплексами и приборами при проведении плановых видов текущего обслуживания и ремонта в депо.

В современных условиях в ОАО «РЖД» прорабатывается вопрос по снижению затрат на ремонт и содержание парка моторвагонного подвижного состава за счет перехода на систему обслуживания «по фактическому техническому состоянию», в том числе при внедрении элементов диагностики узлов МВПС в пути следования с онлайн-передачей информации об их текущем состоянии на пульт оператора (машиниста).

Система технического диагностирования предназначена для определения и прогнозирования предотказного и отказного технического состояния вращающихся узлов и деталей оборудования ходовых частей, тяговой передачи, двигателей МВПС.

Практически во всех современных системах контроля и диагностики в качестве чувствительных элементов используются пьезоакселерометры. Датчики, построенные на пьезокристаллах, являются широкополосными по определению. Резонансная частота находится в пределах от 25 до 35 кГц, динамический диапазон — от 10 до 50 г и более.

В диапазоне частот от 0 до 10 Гц падение чувствительности может достигать 3 дБ. В диапазонах частот до 0,3 и до 0,5 резонансной частоты ошибка, как правило, не превышает 10 и 30 % соответственно.

Плотность шума пьезоакселерометра в полосе частот более 100 Гц не превышает 2 мкд, на частоте 10 Гц — 7 мкд, на частоте 1 Гц — до 70 мкд. Относительные проблемы с шумом пьезоакселерометра появляются только в узком диапазоне низких частот — ниже 5 Гц.

Широкие динамический и частотный диапазоны, малый уровень шума позволяют использовать пьезоакселерометры как универсальные датчики контроля и диагностики вибрационного состояния узлов МВПС. Общий шум канала измерения определяется шумом чувствительного элемента и шумом используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Частота опроса должна быть как минимум в два раза выше собственной частоты пьезокристалла — порядка 70–100 кГц.

В настоящее время МЭМС-датчики¹ вибрации и виброудара также используются при контроле и диагностике технического состояния машин и механизмов. МЭМС-виброакселерометры разрабатываются различными фирмами, в частности Analog Device. Так, в работе [1] представлен опыт использования интеллектуальных датчиков Analog Device при контроле и вибродиагностике промышленного оборудования. Описаны следующие типы датчиков: ADXL 001 [2], ADIS 16229 [3], ADIS 16227 [4]. Датчики ADXL — с аналоговым или дискретным выводом, но без компьютерной обработки сигнала. Датчики типа ADIS — это интеллектуальные системы, включающие в себя полный цикл обработки, в частности БПФ (обработка сигнала быстрым преобразованием Фурье), формирование диагностических признаков и выработку сигналов защиты.

В отличие от пьезоакселерометра широкополосный МЭМС-акселерометр имеет очень высокий уровень шума. Плотность шума в диапазоне рабочих частот может достигать 3 мг и более. Среднеквадратическое значение шума МЭМС-акселерометра фирмы Analog Device ADIS 16227 в полосе частот от 10 до 10000 Гц составляет 467 мг. Для снижения уровня шума при работе с МЭМС-акселерометрами используют полосовую фильтрацию. В табл. 1 приведены характеристики низкочастотных фильтров МЭМС-акселерометра ADIS 16227. Общее количество фильтров 4, максимальная полоса частот — от 0 до 26000 Гц с уровнем шума 467 мг. В соответствии с требованиями ГОСТ ISO 2954–2014 [5] полоса частот должна составлять от 10 до 1000 Гц. Фильтр, отдаленно отвечающий этому требованию, — с полосой частот 0–783 Гц и уровнем шума 100 мг.

Более широкой гаммой фильтров обладает МЭМС-акселерометр ADIS 16223 [6]. В табл. 2 и 3 приведены характеристики его низкочастотных и полосовых фильтров. Общее число низкочастотных фильтров, которые могут быть выбраны, с диапазоном частот от 0–22 до 0–31 Гц. Максимальная частота опроса 73 кГц. Уровень шума находится в пределах

Таблица 1

Характеристики фильтров МЭМС-акселерометра ADIS 16227

Обозначение	Выборка, количество	Ширина линии в спектре, Гц	Полоса частот, Гц	Шум, мг
SR0	100189	196	26000	467
SR1	12524	25	6262	260
SR2	1566	3,1	783	100
SR3	196	0,38	98	38

¹МЭМС — микроэлектромеханические системы.

Таблица 2

Характеристики низкочастотных фильтров ADIS 16223

D	N_D	f_{SC} , Гц	f_C (–3дБ)	Шум, мг
0	1	72900	22500	465
1	2	36500	14200	386
2	4	18200	7780	302
3	8	9110	3990	227
4	16	4560	2010	164
5	32	2280	1010	117
6	64	1140	504	83
7	128	570	252	58,8
8	256	285	126	41,6
9	512	142	62,7	29,7
10	1024	71,2	31,4	21,2

Примечание. D — номер фильтра, N_D — выборка, f_{SC} — полоса частот, f_C — снижение чувствительности на границе.

Таблица 3

Характеристики полосовых фильтров ADIS 16223

D	N_D	f_{SC} , Гц	F_1 , Гц	F_2 , Гц	Шум, мг
0	1	72900	2500	10000	281
1	2	36500	1250	5000	217
2	4	18200	625	2500	158
3	8	9110	313	1250	110
4	16	4560	156	625	78,5
5	32	2280	78,1	313	55,6
6	64	1140	39,1	156	39,1
7	128	570	19,5	78,1	27,8
8	256	285	9,8	39,1	19,9
9	512	142	4,9	19,5	14,2
10	1024	71,2	2,4	9,8	10,2

Примечание. F_1 и F_2 — нижняя и верхняя границы фильтра.

Таблица 4

Характеристики низкочастотных фильтров ADIS 16228

Обозначение	Выборка за секунду	Полоса частот, Гц	Ширина линии в спектре, Гц	Шум (линия в спектре), мг
0	20480	10240	40	5,18
1	10240	5120	20	3,66
2	5120	2560	10	2,59
3	2560	1280	5	1,83
4	1280	640	2,5	1,29
5	640	320	1,250	0,91
6	320	160	0,625	0,65
7	160	80	0,313	0,46
8	80	40	0,156	0,32
9	40	20	0,078	0,23
10	20	10	0,039	0,16

от 465 мг до минимального значения 21 мг. В полосе частот до 1 кГц (см. табл. 2, фильтр № 5) уровень шума равен 117 мг (среднеквадратическое значение). Полосовые фильтры также имеют очень высокий уровень шума (см. табл. 3). Для фильтров с максимально широкой полосой частот от 2500 до 10000 Гц он составляет 281 мг, а в полосе частот от 313 до 1250 Гц — 110 мг.

Уровень шума широкополосного МЭМС-акселерометра (см. табл. 2) в полосе частот от 0 до 1000 Гц не менее 100 мг, в полосе частот от 0 до 10000 Гц не менее 400 мг. Характеристики МЭМС-акселерометра ADIS 16228 [7] приведены в табл. 4. Эта микросхема с меньшим динамическим диапазоном, всего ± 18 g, и существенно меньшим шумом. Плотность шума в диапазоне частот от 1 до 1000 Гц составляет 0,248 мг/(Гц) $^{1/2}$. Среднеквадратическое значение шума в полосе частот от 0 до 10000 Гц (частота опроса 20480 Гц) не превышает 12 мг. Кроме того, резонансная частота составляет 5,5 кГц, что существенно сужает полосу частот пропускания сигнала. По этим параметрам микросхему ADIS 16228 уже нельзя назвать в полной мере широкополосной.

Наименьшее разрешение для частоты опроса 20480 Гц не превышает 40 Гц (см. табл. 4). Можно улучшить разрешение, если выбрать более узкий полосовой фильтр. Например, для фильтра с частотой 1280 Гц разрешение, размер линии спектра, будет 5 Гц, для фильтра с полосой частот до 640 Гц — 2 Гц. Однако в этом случае мы выходим из полосы частот, соответствующей требованиям ГОСТ ISO 2954–2014 [5].

Типичная спектральная характеристика с разрешением 1 Гц представлена на рис. 1. Можно выделить оборотную частоту и гармонические составляющие.

Размер выборки сигнала определяет разрешение линии спектральной характеристики. На рис. 2 представлена спектральная характеристика после обработки алгоритмом БПФ.

Линии спектральной характеристики позволяют определить предельно допустимый уровень вибрации и формировать предупредительную сигнализацию.

Развитие технологий и совершенствование дизайна позволило создать новые прецизионные аналоговые МЭМС-акселерометры с ультразвуковым уровнем шума.

Так, МЭМС-акселерометры ADXL 1001 и ADXL 1002 [8] (фирма Analog Devices) с резонансной частотой 21 кГц имеют уровень шума не более 35 мкг, динамический диапазон — 50 и 100 g соответственно. Плотность шума в полосе частот от 0 до 10 Гц показана на рис. 3, а в полосе частот от 10 до 100 кГц — на рис. 4. Максимальный уровень шума в области резонанса в диапазоне от 20 до 25 кГц не превышает 60 мкг.

Электронный шум канала измерения вибропараметров зависит не только от шума непосредственно чувствительного элемента, пьезокристалла или МЭМС-акселерометра, но и от дальнейшей обработки сигнала, в первую очередь от работы АЦП. Важным параметром является отношение «сигнал — шум» (SNR). Собственный электронный шум АЦП должен быть не менее чем на 70 дБ ниже максимального значения выходного сигнала — таково требование ГОСТ ISO 16063–1–2013 [9].

Для идеального АЦП отношение «сигнал — шум» определяется формулой

$$SNR = 6,02 \cdot N + 1,76 \text{ дБ},$$

где N — разрядность АЦП.

При увеличении разрядности качество оцифровывания повышается. Идеальное отношение «сигнал — шум» 12-разрядного АЦП составляет [10]

$$SNR = 6,02 \cdot 12 + 1,76 = 74,04 \text{ дБ}.$$

Реальный SNR 12-разрядного АЦП не достигает этих показателей. С учетом дисторсии и компонентов электронного шума он равен 70 дБ [10]. Это минимальное значение, удовлетворяющее требованию ГОСТ ISO 16063–1–2013 [9].

Существенно улучшить отношение «сигнал — шум» позволяет увеличение разрядности. В частности, для 16-разрядного АЦП

$$SNR = 6,02 \cdot 16 + 1,76 = 98 \text{ дБ},$$

для 24-разрядного АЦП

$$SNR = 6,02 \cdot 24 + 1,76 = 146 \text{ дБ}.$$

Можно повысить разрешение АЦП, если использовать не отношение сигнала к шуму, а плотность спектрального шума (NSD)². Размер выборки определяется частотой и временем выборки. Если время выборки равно 1 с, то линия в спектре будет шириной 1 Гц. В этом случае отношение «сигнал — шум» в полосе одной линии будет равно плотности шума [11]:

$$NSD = SNR - 10\log_{10}(f_s/2),$$

где f_s — частота опроса.

Для 16-разрядного АЦП с частотой опроса 100 кГц и динамическим диапазоном 100 г плотность шума в полосе частот 1 Гц равна

$$NSD = -98 - 46,9 = -144,9 \text{ дБ}.$$

Для 24-разрядного АЦП с частотой опроса 100 кГц и динамическим диапазоном 100 г плотность шума в полосе частот 1 Гц составит

$$NSD = -146 - 46,9 = -192,9 \text{ дБ}.$$

²Плотность — отношение «сигнал — шум» в полосе частот 1 Гц.

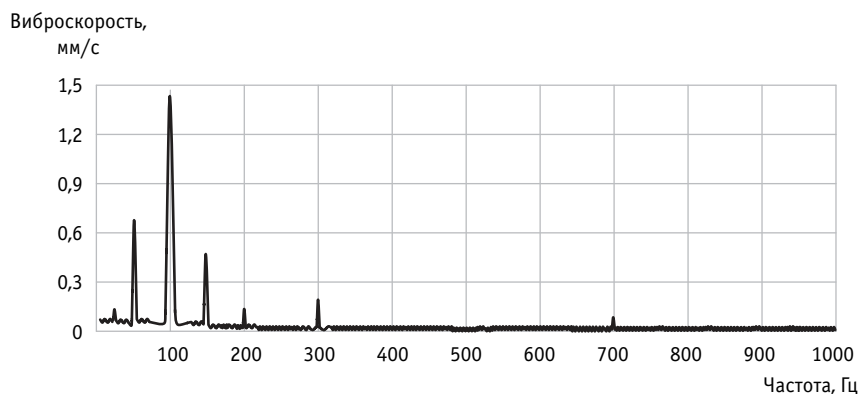


Рис. 1. Типичная спектральная характеристика электродвигателя

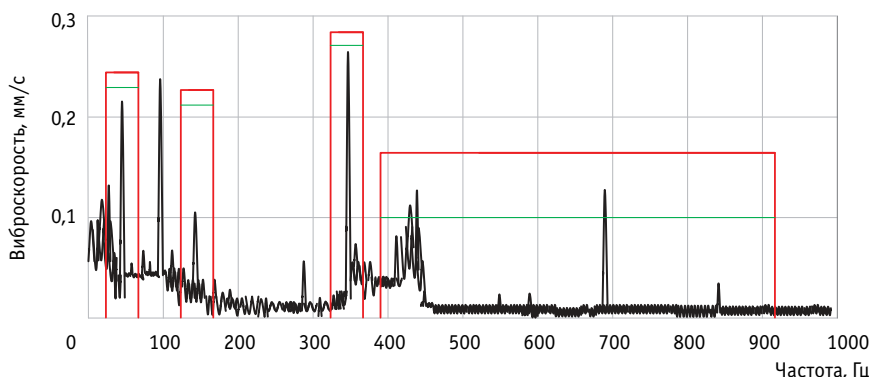


Рис. 2. Типичная спектральная характеристика центробежного насоса после обработки сигнала алгоритмом БПФ и формирования предупредительных и аварийных сигналов

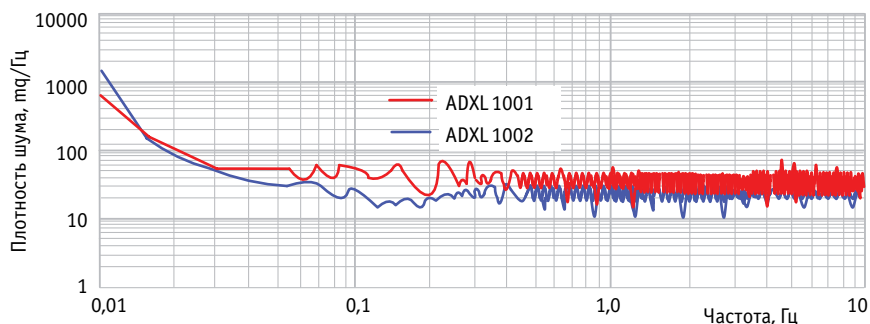


Рис. 3. Плотность шума МЭМС-акселерометров ADXL 1001 и ADXL 1002 в полосе частот до 10 Гц

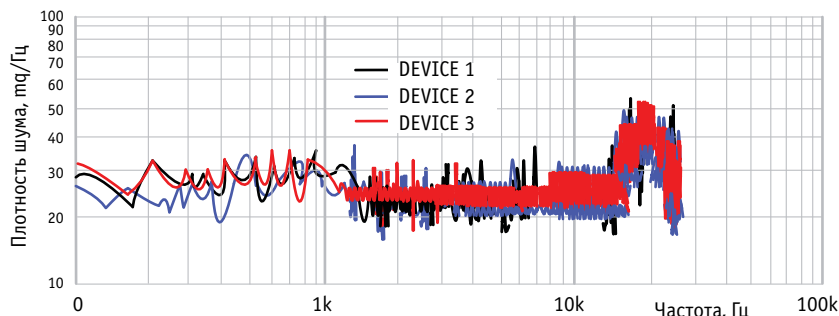


Рис. 4. Плотность шума МЭМС-акселерометров ADXL 1002 в полосе частот от 10 Гц до 100 кГц

Плотность спектрального шума в полосе частот линии спектра размером 1 Гц для идеального 16-разрядного АЦП представлена на рис. 5, а для 24-разрядного АЦП — на рис. 6.

Если использовать предварительную обработку сигнала быстрым преобразованием Фурье, то для 12-разрядного АЦП также можно существенно повысить отношение «сигнал — шум». Например, для узкополосного МЭМС-акселерометра с рабочей полосой частот от 10 до 1000 Гц с 12-разрядным АЦП при частоте опроса 8 кГц и времени выборки 100 мс ширина линии спектра равна 10 Гц. Плотность шума линии спектра в этом случае составит

$$NSD = -74 - 26 = -100 \text{ дБ.}$$

Для того же МЭМС-акселерометра и той же частоты опроса, но с выборкой 1000 мс (1 с) ширина линии спектра 1 Гц. Плотность шума в этом случае будет равна (рис. 7)

$$NSD = -74 - 36 = -110 \text{ дБ.}$$

Таким образом, 12-, 16- и 24-разрядные АЦП по уровню отношения «сигнал — шум» могут использоваться для контроля вибрационных параметров основных и вспомогательных узлов МВПС, подшипниковых узлов тяговых двигателей и колесно-моторных блоков электропоездов. Лучшим для измерений вибропараметров можно считать 16-разрядный АЦП, однако и 12-разрядный АЦП может применяться, поскольку он тоже удовлетворяет требованиям стандарта [9].

ВЫВОДЫ

1. Широкополосные МЭМС-датчики вибрации с большим динамическим диапазоном имеют высокий уровень электронного шума, СКЗ до 400 мг и не могут быть рекомендованы для контроля вибрационного состояния основных и вспомогательных узлов МВПС.

2. Прецизионные МЭМС-датчики вибрации имеют приемлемый уровень электронного шума. Плотность шума не более 30–40 мкг.

3. Уровень электронного шума 12-разрядного АЦП удовлетворяет требованиям ГОСТ ISO 16063–1–2013. Отношение «сигнал — шум» находится в пределах 70 дБ, плотность электронного шума — в пределах 100 мкг.

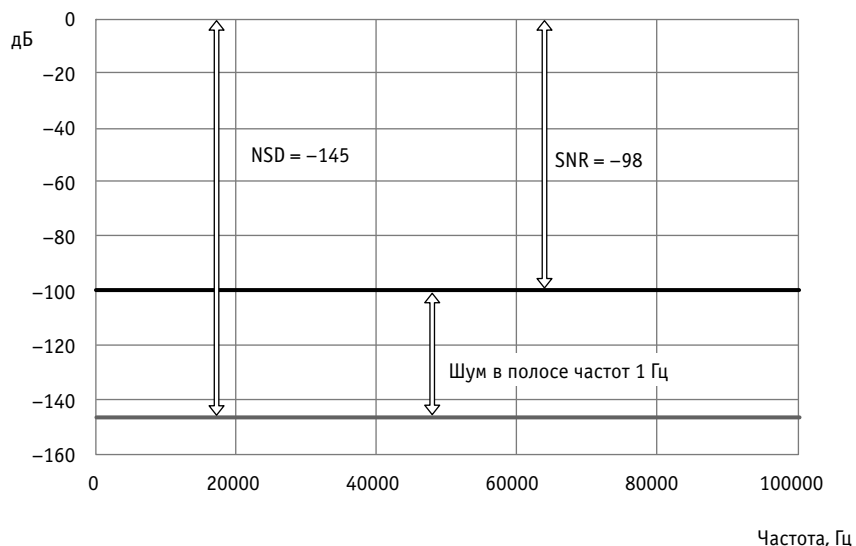


Рис. 5. Отношение «сигнал — шум» идеального 16-разрядного АЦП при плотности спектрального шума в полосе частот линии спектра 1 Гц

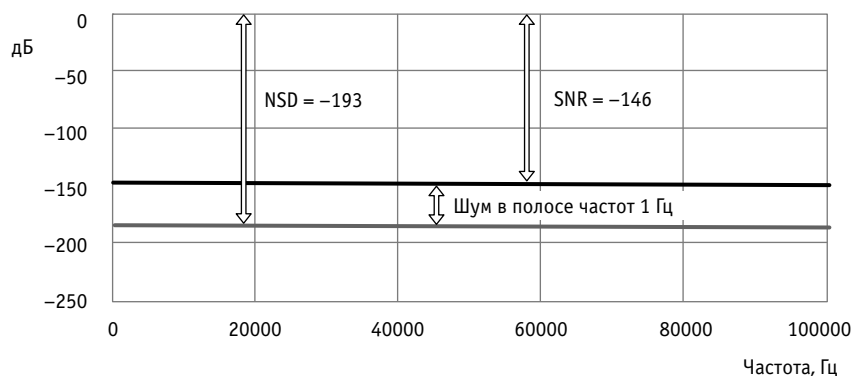


Рис. 6. Отношение «сигнал — шум» идеального 24-разрядного АЦП при плотности спектрального шума в полосе частот линии спектра 1 Гц

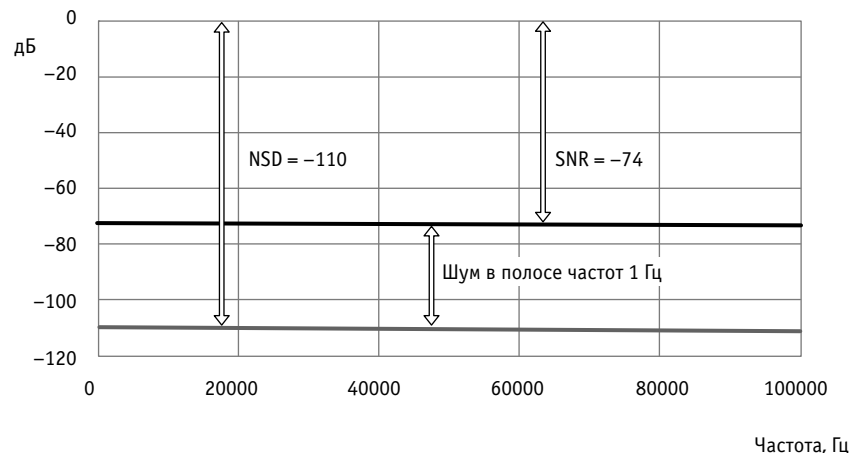


Рис. 7. Отношение «сигнал — шум» идеального 12-разрядного АЦП при плотности спектрального шума в полосе частот линии спектра 1 Гц

Литература

1. Analog Devices' Award Winning iSensor Technology : Highly Integrated and Programmable Motion Sensor Processing for Industrial Applications.
2. Analog Devices' Press Releases: about ADXRS 450, May 11, 2010; about ADIS 16135, ADIS 15385, Jun. 9, 2010; about ADIS 16223, Jun. 14, 2010; about ADXRS 453, Sep. 29, 2010; about ADIS 16227, Nov. 9, 2010; about ADIS 16334, ADIS 16375, Nov. 9, 2010.
3. Analog Devices' Data Sheets: ADXL312, Rev. PrC, 11/10; ADXL345, Rev. A, 4/10; ADXL346, Rev. 0, 5/10; ADXRS 450, Rev. PrA, 4/10; ADXRS 453, Rev. PrA, 7/10; ADXRS 652, Rev. A, 7/10; ADIS 16133, Rev. 0, 9/10; ADIS 16135, Rev. 0, 4/10; ADIS 16223, Rev. 0, 6/10; ADIS 16227, Rev. 0, 10/10; ADIS 16300, Rev. A, 4/09; ADIS 16305, Rev. 0, 7/10; ADIS 16334, Rev. PrB, 2010; ADIS 16360/ADIS 16365, Rev. C, 8/10; ADIS 16362, Rev. B, 12/09; ADIS 16364, Rev. C, 8/10; ADIS 16367, Rev. 0, 1/10; ADIS 16375, Rev. 0, 10/10; ADIS 16385, Rev. A, 8/10; ADIS 16400/ADIS 16405, Rev. B, 7/09.
4. Analog Devices' Application Notes: AN-1041, Rev. 0, 8/09; AN-1042, Rev. 0, 8/09; AN-1045, Rev. 0, 11/09; AN-1049, Rev. 0, 10/09; AN-1057, Rev. 0, 2/10; AN-1073, Rev. 0, 4/10.
5. ГОСТ ISO 2954–2014. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений. Москва : Стандартинформ, 2014. 15 с.
6. Analog Devices' Application Notes: AN-1041, Rev. 0, 8/09; AN-1042, Rev. 0, 8/09; AN-1045, Rev. 0, 11/09; AN-1049, Rev. 0, 10/09; AN-1057, Rev. 0, 2/10; AN-1073, Rev. 0, 4/10.
7. Analog Devices' Circuit Notes: Sensing Low-g Acceleration Using the ADXL345 Digital Accelerometer Connected to the ADuC7024 Precision Analog Microcontroller : CN-0133, Rev. 0, 10/09; Sensing Angular Velocity Using the ADXRS 450 Digital Rate Sensor with Programmable Supply Voltage : CN-0163, Rev. 0, 5/10.
8. Low Noise, MEMS Accelerometers ADXL 1001/1002. Analog Devices, Data Sheet.
9. ГОСТ ISO 16063–1–2013. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 1. Основные положения. Москва : Стандартинформ, 2014. 24 с.
10. Analog Devices' iSensor PC Evaluation System ADISEVAL, Rev. PrC, 7/08.
11. Looney M. Analog Devices' iSensor Demo/Evaluation Tips for the ADIS 1640x. Feb. 2009.

References

1. Analog Devices' Award Winning iSensor Technology : Highly Integrated and Programmable Motion Sensor Processing for Industrial Applications.
2. Analog Devices' Press Releases: about ADXRS450, May 11, 2010; about ADIS16135, ADIS15385, Jun. 9, 2010; about ADIS16223, Jun. 14, 2010; about ADXRS453, Sep. 29, 2010; about ADIS16227, Nov. 9, 2010; about ADIS16334, ADIS16375, Nov. 9, 2010.
3. Analog Devices' Data Sheets: ADXL312, Rev. PrC, 11/10; ADXL345, Rev. A, 4/10; ADXL346, Rev. 0, 5/10; ADXRS450, Rev. PrA, 4/10; ADXRS453, Rev. PrA, 7/10; ADXRS652, Rev. A, 7/10; ADIS16133, Rev. 0, 9/10; ADIS16135, Rev. 0, 4/10; ADIS16223, Rev. 0, 6/10; ADIS16227, Rev. 0, 10/10; ADIS16300, Rev. A, 4/09; ADIS16305, Rev. 0, 7/10; ADIS16334, Rev. PrB, 2010; ADIS16360/ADIS16365, Rev. C, 8/10; ADIS16362, Rev. B, 12/09; ADIS16364, Rev. C, 8/10; ADIS16367, Rev. 0, 1/10; ADIS16375, Rev. 0, 10/10; ADIS16385, Rev. A, 8/10; ADIS16400/ADIS16405, Rev. B, 7/09.
4. Analog Devices' Application Notes: AN-1041, Rev. 0, 8/09; AN-1042, Rev. 0, 8/09; AN-1045, Rev. 0, 11/09; AN-1049, Rev. 0, 10/09; AN-1057, Rev. 0, 2/10; AN-1073, Rev. 0, 4/10.
5. GOST ISO 2954–2014. Mechanical vibration. Condition monitoring of machinery using measurements made on non-rotating parts. Requirements for instruments [Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na nevrashhayushhikhsya chast-yakh. Trebovaniya k sredstvam izmereniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 15 p.
6. Analog Devices' Application Notes: AN-1041, Rev. 0, 8/09; AN-1042, Rev. 0, 8/09; AN-1045, Rev. 0, 11/09; AN-1049, Rev. 0, 10/09; AN-1057, Rev. 0, 2/10; AN-1073, Rev. 0, 4/10.
7. Analog Devices' Circuit Notes: Sensing Low-g Acceleration Using the ADXL345 Digital Accelerometer Connected to the ADuC7024 Precision Analog Microcontroller : CN-0133, Rev. 0, 10/09; Sensing Angular Velocity Using the ADXRS450 Digital Rate Sensor with Programmable Supply Voltage : CN-0163, Rev. 0, 5/10.
8. Low Noise, MEMS Accelerometers ADXL 1001/1002. Analog Devices, Data Sheet.
9. GOST ISO 16063–1–2013. Vibration. Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 1. Basic concepts [Vibratsiya. Metody kalibrovki datchikov vibratsii i udara. Chast' 1. Osnovnye polozheniya]. Moscow : Standardinform, 2014. 24 p.
10. Analog Devices' iSensor PC Evaluation System ADISEVAL, Rev. PrC, 7/08.
11. Looney M. Analog Devices' iSensor Demo/Evaluation Tips for the ADIS1640x. Feb. 2009.

Объем статьи 0,58 авторских листа

656.2.071.1

Геннадий Львович Аккерман, доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия
Сергей Геннадьевич Аккерман, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

КОНТРАГЕНТЫ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ЛИНЕЙНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Gennadiy Lvovich Akkerman, DSc in Engineering, Professor, Railway Construction and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Sergey Gennadyevich Akkerman, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Construction and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Counterparts in life cycle of linear enterprises

Аннотация

В статье рассматривается модель взаимодействия линейных предприятий с контрагентами. Если контрагент выполняет работы в летний и зимний период, то его «орбиту» можно представить в виде эллипса или в зависимости от рассматриваемых условий в виде одной из ветвей гиперболы. Расстояние от работодателя до контрагента в этом случае характеризует их взаимный интерес. Если контрагентов несколько, то модель позволяет проранжировать их с точки зрения не только деловой, но и личной заинтересованности заказчика.

Ключевые слова: предприятие, заказчик, контрагент, подрядчик, капитал, масса, скорость, ускорение, сила, эллипс, гипербола, интерес.

Summary

The paper considers a model of interaction between linear enterprises and counterparts. If a counterpart executes works in summer or winter period, it's «orbit» may be represented in the form of ellipse or, depending on considered conditions, in the form of one of the half-hyperbola. Distance between the employer and the counterpart in this case characterize their mutual interest. If there are several counterparts, the model allows ranking them from the point of view not only business, but also personal interest of the customer.

Keywords: enterprise, customer, counterpart, contractor, funds, mass, speed, acceleration, force, ellipse, hyperbola, interest.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-16-19

Процесс реформирования любой транспортной отрасли России, в том числе железных дорог, связан с довольно сложной проблемой: предприятия, которые были частью производственно-организационной структуры, часто становятся внешними контрагентами. Примером могут служить путевые машинные станции (ПМС) и дорпроектные, которые выведены из структуры службы пути.

Под линейным предприятием (ЛП) в статье понимается предприятие с линейной организационной структурой, его объекты размещены на одной линии (необязательно по прямой), положение которой в пространстве фиксировано в результате изыскательских и проектных работ. Изыскательские и проектные работы представляют собой начало жизненного цикла предприятия, последующие этапы — это строительство, эксплуатация, часто реконструкция и снова эксплуатация. Жизненный цикл предприятия заканчивается, когда потребность в нем исчезает.

Под контрагентом понимается предприятие или частное лицо, с которым ЛП заключает договор гражданско-правовых отношений.

Примерами ЛП являются предприятия железных и автомобильных дорог, подразделения, обслуживающие ЛЭП, линии связи и различного вида трубопроводы. На всех этапах жизненного цикла линейное предприятие взаимодействует с функционально неодинаковыми и различными во времени и пространстве контрагентами, такими как проектные институты (дорпроектные и др.), строительные организации, путевые машинные станции, мостопоезда и др. Сюда же можно отнести и контрагентов, которые пользуются услугами предприятия, например грузоотправителей и получателей. Часть из этих контрагентов работает с линейным предприятием на одном из этапов его жизненного цикла, другие связаны с ЛП на протяжении всего жизненного цикла.

Виды и объемы работ контрагентов различаются не только по этапам жизненного цикла. Так как транспортная система (линейное предприятие) функционирует круглый год под открытым небом, то технология и стоимость работ, выполняемых в зимний и летний период, резко отличается [1].

Часто взаимодействие предприятия с контрагентами носит субъективный характер. Применение к этому процессу объектив-

ных законов: всемирного тяготения, закона Кулона и др., чему и посвящена данная статья, позволяет избежать упомянутого недостатка. Следует отметить, что использование в экономике законов из «далекой» области науки дает положительный эффект (см., например, [2]).

Обозначим основной капитал ЛП через M . В случае летних и зимних работ ресурс M_{Pi} предназначенный контрагенту i , как бы раздваивается на летний M_{Li} и зимний M_{3i} :

$$M_{Pi} = M_{Li} + M_{3i}. \quad (1)$$

Сказанное легко представить геометрически — в виде эллипса (рис. 1) [3, 4].

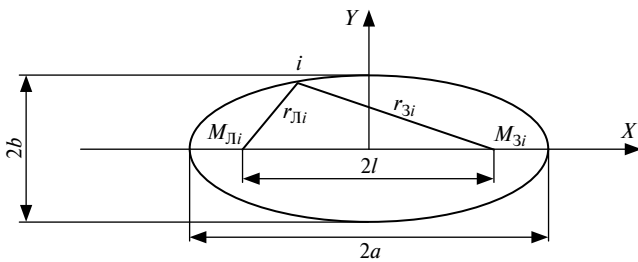


Рис. 1. Условная «орбита» контрагента i при зимних и летних работах

В этом случае расстояние r_i от ЛП до контрагента i с основным капиталом m_i можно трактовать как их интерес. Чем меньше r , тем меньше ЛП интересуется контрагентом, ресурс работ которого m_i^P ,

$$r_i = r_{Li} + r_{3i}. \quad (2)$$

Так как контрагентов может быть несколько (n), то

$$\begin{aligned} M &\gg m_i; 0 \leq i \leq n, \\ m_i^P &= m_{Li}^P + m_{3i}^P. \end{aligned} \quad (3)$$

У каждого контрагента могут быть свои контрагенты. Назовем их подрядчиками, всего их K , основной капитал каждого из них обозначим m_{ij}

$$0 \leq j \leq K.$$

Можно предположить, что модель взаимодействия ЛП и контрагентов согласуется с двумя гипотезами.

Первая: между ЛП и контрагентом существует сила притяжения, которая аналогична закону всемирного притяжения [5] Ньютона и определяется как

$$F_T = f \frac{M m_i}{r^2}. \quad (4)$$

Здесь f — постоянная, которая численно равна «силе взаимного притяжения между двумя точками, которые обладают

одинаковыми характеристиками, равными единице, и находятся друг от друга на расстоянии, равном единице» [5, с. 47].

Формулу (4) в более общем случае можно интерпретировать следующим образом: силы взаимодействия между двумя объектами прямо пропорциональны произведению меры их значимости (капиталу или какому-то другому субъективному интересу) и обратно пропорциональны расстоянию между этими объектами, т.е.

$$F_T = f \frac{P_i^\alpha \cdot P_j^\beta}{r_{ij}^\gamma}, \quad (4')$$

где P — мера значимости, в случае если это величина основного капитала, $P = m$;

α, β, γ — степенные показатели (параметры модели).

При $\alpha = \beta = 1$ и $\gamma = 2$ получаем формулу (4) (закон всемирного тяготения или закон Кулона — взаимодействие двух точечных зарядов). Если $\gamma = 1$, то F_T — сила притяжения между двумя параллельными проводниками.

Если это взаимодействие принять за динамический процесс, то возможна вторая гипотеза. Сила отталкивания контрагента от ЛП (центробежная сила) $F_{Ц}$ определяется по формуле

$$F_{Ц} = \frac{m_i \cdot V_i^2}{r}, \quad (5)$$

где V_i — скорость изменения характеристики m_i за время t ,

$$V = \frac{m_i}{t}. \quad (6)$$

Масса тел в классической механике — это характеристика их гравитационного взаимодействия. С другой стороны, это величина, которая характеризует инертность тела. У большей массы — больше сила притяжения, но и инертность больше.

Поэтому рассматривать в предлагаемой модели массу как основной капитал естественно: чем больше основной капитал, тем солиднее предприятие. Кстати, из нескольких потенциальных контрагентов чаще всего выбирают того, у которого основной капитал больше, чем у других, как наиболее успешного, а значит, и более надежного партнера.

Для рассматриваемого случая:

$$F_{TL} = f \frac{M_{Li} \cdot m_{Li}}{r_{Li}^2}; F_{T3} = f \frac{M_{3i} \cdot m_{3i}}{r_{3i}^2}; \quad (7)$$

$$F_{ЦL} = f \frac{m_{Li} \cdot V_i^2}{r_{Li}^2}; F_{Ц3} = f \frac{m_{3i} \cdot V_i^2}{r_{3i}^2}, \quad (8)$$

где индексы Л и 3 указывают на работы в летний и зимний период.

Из условия равновесия:

$$F_{TL} = F_{ЦL}; F_{T3} = F_{Ц3}. \quad (9)$$

Из условия (7)–(9), учитывая, что $V = \frac{m_i}{t}$, получаем:

$$r_{Li} = \frac{f \cdot M_{Li} \cdot t_{Li}^2}{\alpha_L \cdot m_i}; r_{3i} = \frac{f \cdot M_{3i} \cdot t_{3i}^2}{\alpha_3 \cdot m_i}, \quad (10)$$

где α_L и α_3 — соответственно доля выполнения договора контрагентом летом и зимой;

$$t_i = t_{Li} + t_{3i}, \quad (11)$$

где t_i — время выполнения договора i -м контрагентом.

Уравнение эллипса имеет вид

$$\frac{X^2}{d^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1, \quad (12)$$

где d и b — полуоси эллипса.

Если летние объемы заказа равны зимним, то $r_{Li} = r_{3i} = \text{const}$ и эллипс превращается в окружность.

Если контрагент работает с ЛП непостоянно, т.е.

$$0 \leq r \leq \infty,$$

то траектория его движения описывается гиперболой:

$$\frac{X^2}{d^2} - \frac{Y^2}{b^2} = 1. \quad (13)$$

Небесные тела в космосе движутся по эллиптической или гиперболической орбите, т.е. предлагаемая модель аналогична законам небесной механики.

Если $r_L = r_3 = 0$, то $2I = 0$ (см. рис. 1), т.е. все работы по договору контрагент выполняет либо только летом, либо зимой. Это отвечает существу рассматриваемых работ, поскольку дешевле и проще их выполнять летом (примером могут служить замена балласта на железных дорогах или укладка асфальта на автодорогах), но есть и такие, которые желательно выполнять только зимой (отсыпка земляного полотна с выторфовойкой на болотах).

Согласно закону всемирного тяготения существует гравитационное поле, которое является потенциальным. Если поле создается расположенной в начале координат точкой с массой M , то его потенциал определяется как

$$\varphi(r) = -f \frac{M}{r}. \quad (14)$$

Вполне естественно, что M можно заменить на m_i или на m_{ij} , если у i -го контрагента есть свои j -е контрагенты (всего их K).

Тогда масса i -го контрагента равняется $m_i + \sum_j^K m_{ij}$.

Согласно закону всемирного тяготения, сила притяжения F_T (4), действующая между двумя телами, направлена вдоль вектора \vec{r} (рис. 2):

$$\vec{r} = \vec{r}_i + \vec{r}_{ij}. \quad (15)$$

На рис. 2 ось y — ось капитала i -го контрагента m_i , а ось x — ось капитала субподрядчика m_{ij} .

В общем случае это пространство не двух-, а трехмерное. Третья ось — ось времени t . Когда у контрагентов нет своих подрядчиков, $r_{ij} = 0$.

Если в формулы (10) вместо M_L или M_3 подставим M , учитывая, что за время t выполняется δ работ от m_i , то получим

$$r = \frac{fM}{d}. \quad (16)$$

Единицы измерения r получим, подставив размерности ве-

личин. Например, если M и δm_i — руб., а t — сут, то $r \left(d \frac{\text{руб.}}{\text{сут}^2} \right)$.

Здесь $d = \frac{\delta m_i}{t^2}$ — ускорение выполнения работ δm_i за время t .

Таким образом, интерес (расстояние r между контрагентом и ЛП) обратно пропорционален ускорению (скорости изменения выполнения объема работ δm_i). Чем меньше время на выполнение проекта (чем меньше r), тем меньше интерес контрагента к этому проекту.

Договор, заключенный контрагентом с ЛП, оплачивается полностью после окончания работ: $\delta = 1$. Если $\delta = 1$, то $r = r_n$, поэтому «орбиту» контрагента по отношению к ЛП можно определить как одну из ветвей гиперболы (рис. 3).

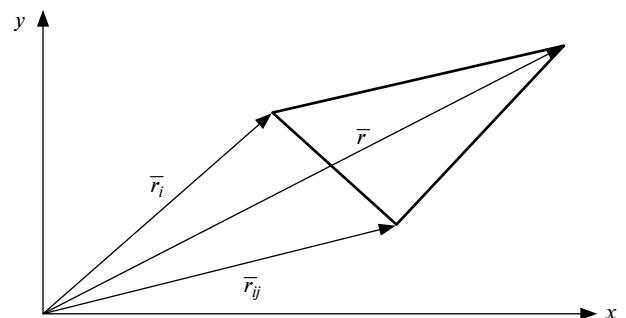


Рис. 2. Сложение векторов \vec{r}_i и \vec{r}_{ij}

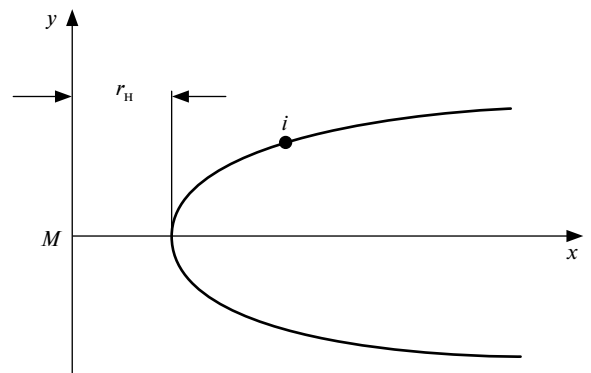


Рис. 3. «Орбита» контрагента как одна из ветвей гиперболы

Во взаимоотношениях «ЛП — контрагент», «контрагент — подрядчик» значительную роль играет человеческий фактор, который может проявляться в виде личной заинтересованности (коррупционных схем), когда часть оплаты по договору возвращается заказчику в виде отката $\varepsilon \delta m_i$. У контрагента реальная сумма $(1 - \varepsilon) \delta m_i$. Так как решающее значение для лица, подписывающего договор со стороны ЛП (в общем случае — заказчика), имеет сумма $\varepsilon \delta m_i$, то формула (16) примет вид

$$r = \frac{f M t^2}{\delta m_i (1 - \varepsilon)}. \quad (17)$$

То есть расстояние между ЛП (заказчиком) и контрагентом увеличивается с ростом ε . Таким образом, чем больше доля ε , тем значительнее интерес ЛП (заказчика) к проекту. Эти рассуждения можно отнести также к контрагенту и его подрядчикам.

Если у ЛП (заказчика) несколько претендентов на выполнение заказа (проекта), то алгоритм выбора может иметь следующий вид.

По предпочтительным для ЛП (заказчика) параметрам формулы (16) [иногда из личной заинтересованности — по параметрам формулы (17)] лицом, принимающим решение, выбирается рациональный вариант r_p .

Оценивается, во сколько раз Δ этот вариант отличается от остальных:

$$\Delta = \frac{r_p}{r}. \quad (18)$$

Согласно формуле (17), если сроки выполнения договора у контрагентов равны, то

$$\Delta = \frac{\partial'_i m'_i (1 - \varepsilon')}{\partial_i m_i (1 - \varepsilon)}, \quad (19)$$

где штрихом обозначен контрагент, отличный от m_i .

Если $\Delta = 1$, то выбор сделан правильно.

Если $\Delta \ll 1$, то необходимо пересмотреть правильность выбора.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая методика позволяет лицу, принимающему решение, объективно выбирать контрагентов.

2. Интерес ЛП к контрагенту тем больше, чем меньше цена заказа, причем формула (16) позволяет количественно оценить этот интерес.

3. Слишком большое ускорение выполнения договора невыгодно линейному предприятию (r уменьшается), так как, возможно, придется оплачивать договор раньше срока, кроме того, чем меньше ускорение, тем равномернее выполняется договор. Контрагенту тоже это невыгодно, так как при большом ускорении сокращается срок договора.

4. В случае заинтересованности лица, принимающего решение (наличие коррупционной схемы), большое значение имеет процент отката. Чем выше откат, тем контрагент более «благоприятен» [см. формулу (17)].

5. Если контрагентов несколько, то ЛП может их проранжировать с точки зрения своих интересов [см. формулу (18)].

В заключение отметим, что дальнейшие исследования желательно направить на определение законов распределения [6] основного капитала контрагентов при строительстве и эксплуатации железных дорог в зависимости от вида, объема работ и экономической ситуации в регионе.

Литература

1. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г. Транспортная система и экономическая среда // Инновационный транспорт. 2016. № 1 (19). С. 22–24. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-1-22-24. ISSN 2311-164X.
2. Akkerman G., Akkerman S., Sergeev B. Economic and investment fields of railroad sections and station // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116. DOI:10.1007/978-3-030-37919-3. ISSN 2194-5357.
3. Словарь по кибернетике / Под ред. В. С. Михалевича. Киев, 1989. 751 с.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов : изд. 13-е. Москва : Наука, 1986. 544 с.
5. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Москва : Наука, 1968. 187 с.
6. Фатхутдинов Р. А. Стратегический маркетинг : учебник. Москва : Бизнес-школа «Интел-Синтез», 2000. 637 с.

References

1. Akkerman G. L., Akkerman S. G. Transport system and economic environment [Transportnaya sistema i ekonomicheskaya sreda] // Innotrans. 2016. No. 1 (19). Pp. 22–24. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-1-22-24. ISSN 2311-164X.
2. Akkerman G., Akkerman S., Sergeev B. Economic and investment fields of railroad sections and station // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116. DOI:10.1007/978-3-030-37919-3. ISSN 2194-5357.
3. Dictionary on cybernetics [Slovar' po kibernetike] / Ed. by V. S. Mikhailovich. Kiev, 1989. 751 p.
4. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. A Guide-Book to Mathematics for Technologists and Engineers [Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashhikhsya vtuzov] : 13th edition. Moscow : Science, 1986. 544 p.
5. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A. Reference book on physics for engineers and students of universities [Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov]. Moscow : Science, 1968. 187 p.
6. Fatkhutdinov R. A. Strategic marketing [Strategicheskiy marketing] : textbook. Moscow : Business-school «Intel-Synthesis», 2000. 637 p.

УДК 629.4.027.4: 656.2

Андрей Сергеевич Космодамианский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Владимир Иванович Воробьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,
Михаил Юрьевич Капустин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Олег Васильевич Измеров, соискатель по кафедре «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,
Дмитрий Николаевич Шевченко, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Александр Васильевич Сомотканов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта (РОАТ) Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД

Andrey Sergeevich Kosmodamianskiy, DSc in Engineering, Professor, Head of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
Vladimir Ivanovich Vorobyev, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,
Mikhail Yuryevich Kapustin, PhD in Engineering, Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
Oleg Vasilyevich Izmerov, PhD candidate in Engineering, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,
Dmitriy Nikolaevich Shevchenko, Assistant Lecturer, Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
Alexander Vasilyevich Samotkanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Problems of development of traction drives with brushless traction motors for passenger electric locomotives

Аннотация

В статье рассматривается проблема создания новых тяговых приводов пассажирских локомотивов с бесколлекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД). В результате анализа конструкций привода выявлено, что повышение мощности асинхронных двигателей за счет увеличения частоты вращения приводит к противоречию между требованиями надежности конструкции, с одной стороны, и требованиями технологической простоты — с другой. Для разрешения этого противоречия необходимо использовать конструкции ТЭД, имеющие повышенный крутящий момент и минимальные габариты в осевом направлении. Установлено, что таким требованиям соответствуют тяговые электродвигатели с дисковым ротором (осевым магнитным потоком). Предложена агрегатная схема опорно-рамного тягового привода, включающая ТЭД с дисковым ротором, которая позволяет существенно повысить технологичность изготовления и ремонта привода при сохранении надежности. Сделан вывод о целесообразности проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию тяговых электродвигателей электровоза с осевым магнитным потоком. На предложенную конструкцию тягового привода подана заявка на получение патента.

Ключевые слова: тяговый привод локомотива, тяговый электродвигатель с осевым магнитным потоком, надежность, конструирование.

Summary

The paper considers a problem of creation of new traction drives with brushless electric traction motors (ETM) for passenger locomotives. Analysis of drive designs revealed that the increase of power of induction motors through the increase of rotation frequency leads to the contradiction between requirements for the design reliability, on the one hand, and requirements for technological simplicity, on the other hand. In order to solve the contradiction it is necessary to use ETM designs that have enhanced torque and minimal dimensions in axial direction. It is established that ETM with disk rotor (axial magnetic flux) satisfy such requirements. The authors proposed an aggregate scheme of support-frame traction drives that include ETM with disk rotor, which allows significantly increasing the adaptability to manufacture and reparability of drive at preservation of reliability. As a result, the authors made a conclusion about the reasonability of conducting research and development work on creation of locomotive ETM with axial magnetic flux. The authors have submitted an application for a patent on the proposed design of traction drive.

Keywords: locomotive traction drive, traction motor with axial magnetic flux, reliability, design.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-20-25

e-mail: askosm@mail.ru, vladimvorobiev@yandex.ru, roatuour@bk.ru, izmerov@yandex.ru, shevchenkodn.roat@ya.ru, miitlok@bk.ru

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

Для отечественных железных дорог характерно разделение в эксплуатации пассажирских электровозов с коллекторными и бесколлекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД), что объясняется стоимостью последних. Так, электровозы с коллекторными ТЭД мощностью до 800 кВт (ЭП1, ЭП2^К, ранее выпущенные серии ЧС2–ЧС8) обеспечивают движение поездов со скоростями, близкими к тем, которые сложились на сети в конце прошлого столетия, что может быть реализовано с использованием экипажной части, рассчитанной на конструкционную скорость 140–160 км/ч, и модернизированных тяговых приводов ранее созданных конструкций. Пассажирские электровозы ЭП20 с бесколлекторными ТЭД мощностью в 1,5 раза выше (1200 кВт), имеющие более высокую стоимость электрооборудования, применяются для вождения поездов без смены локомотивов в разных системах тока, в ускоренном и скоростном движении, например для вождения дневных поездов на участке Брянск — Москва. Для этих локомотивов используются экипажная часть, рассчитанная на конструкционную скорость 160–200 км/ч, и новая конструкция тягового привода, разработанная фирмой Alstom [1, 2]. Таким образом, дальнейшее развитие тяговых приводов пассажирских электровозов с бесколлекторными ТЭД оказывается зависимым от зарубежных исследований и разработок, в связи с чем возникает проблема поиска новых конструктивных решений, имеющих преимущества перед зарубежными аналогами. Настоящая статья представляет собой попытку решения этой проблемы.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ: АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ИЗВЕСТНЫХ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ

Начиная с 1960-х гг. внедрение асинхронных ТЭД рассматривалось как основной путь увеличения мощности электровозных ТЭД за счет повышения максимальной частоты вращения. В первую очередь это касается ТЭД пассажирских электровозов, мощность которых достигает 1200–1400 кВт. Повышение частоты вращения ТЭД создает проблемы для надежности работы узлов тягового привода [3]. Ранние электровозы с АД (Е120 и др.) имели ту же компоновку привода, что и с коллекторными ТЭД (рис. 1).

Основными минусами такой компоновки являются недостаточная прочность посадки малого зубчатого колеса из-за увеличения окружного усилия на хвостовике вала и снижение долговечности роторного подшипника вследствие увеличения скорости вращения [4, 5]. В приводе типа IGA (рис. 2) для повышения надежности крепления малого зубчатого колеса на валу оно размещено между роторными подшипниками, а один из роторных подшипниковых узлов расположен на кронштейне подшипникового щита или в корпусе редуктора, прифланцованного к корпусу ТЭД. При этом длина поверхности посадки может быть увеличена по сравнению с консольным размещением зубчатого колеса, а осевые нагрузки в передаче более равномерно распределяются между роторными подшипниками [6].

По простоте и технологичности привод типа IGA близок к приводу, показанному на рис. 1, однако, согласно оценке

ВЭЛНИИ, расчетная долговечность подшипников почти не увеличивается. По этой причине на новых пассажирских локомотивах все большее распространение получает привод типа GEALAIF (рис. 3).

В приводе GEALAIF малое зубчатое колесо размещено симметрично между двумя подшипниками, а вал ТЭД опирается на вал редуктора через дисковую металлическую муфту. Такая компоновка позволяет повысить долговечность подшипников в несколько раз и на этом основании была использована для отечественного электровоза ЭП20.

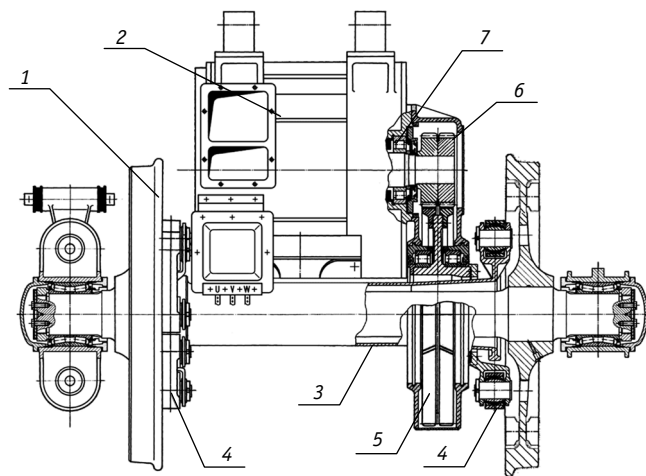


Рис. 1. Тяговый привод с консольным расположением малого зубчатого колеса:

- 1 — колесная пара; 2 — ТЭД; 3 — полый вал;
4 — поводковые муфты; 5 — большое зубчатое колесо;
6 — малое зубчатое колесо; 7 — подшипник

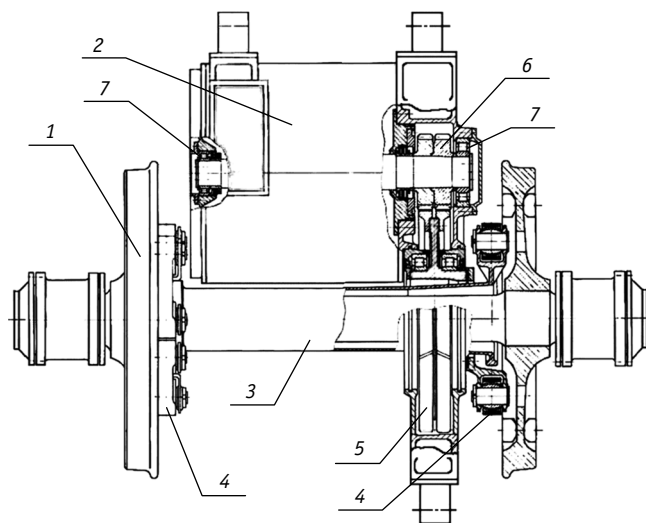


Рис. 2. Тяговый привод типа IGA:

- 1 — колесная пара; 2 — ТЭД; 3 — полый вал;
4 — поводковые муфты; 5 — большое зубчатое колесо;
6 — малое зубчатое колесо; 7 — подшипник

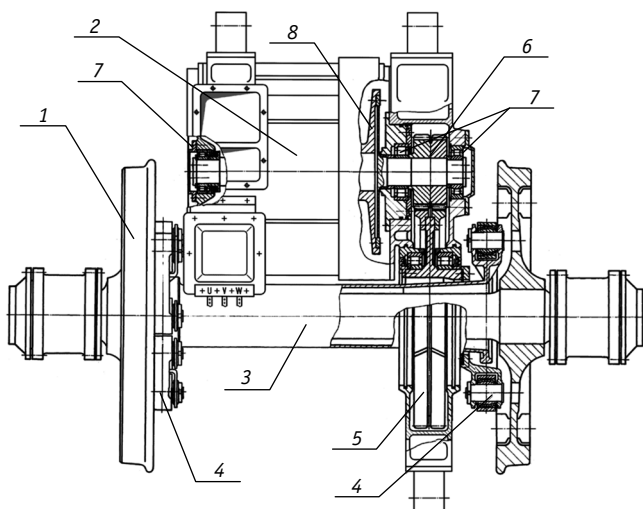


Рис. 3. Тяговый привод типа GEALAIF:

1 — колесная пара; 2 — ТЭД; 3 — полый вал; 4 — поводковые муфты;
5 — большое зубчатое колесо; 6 — малое зубчатое колесо;
7 — подшипник; 8 — дисковая муфта

Основным недостатком компоновки GEALAIF является низкая технологичность [7, 8]. В данном тяговом приводе нет осевых подшипников, на которые одновременно опираются ТЭД и редуктор, однако дисковая муфта, через которую вал ротора ТЭД опирается на вал малого зубчатого колеса редуктора, имеет значительную жесткость на изгиб. Поэтому во избежание значительных усилий, воздействующих на подшипники, точность обработки корпусных деталей ТЭД и редуктора должна быть значительно выше, чем в тяговых приводах с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором. Балансировка и диагностика ТЭД и редуктора возможна только в сборе друг с другом. Все это удорожает производство привода и его ремонт и ограничивает объем выпуска локомотивов с приводом такого типа. За последнее десятилетие построено немногим более 70 электровозов ЭП20, в то время как локомотивов ЭП1 и их модификаций — порядка полутора тысяч.

Таким образом, основная проблема развития опорно-рамного тягового привода пассажирских локомотивов с АТД — необходимость повысить мощность ТЭД за счет увеличения максимальной окружной скорости ротора и одновременно сохранить технологичность привода и способность обеспечить его изготовление и ремонт на технологической базе отечественных предприятий.

Кроме перечисленных выше наиболее распространенных решений известен также опорно-рамный привод электровоза Ansaldo Breda серии E402, в котором тяговая передача и ТЭД выполнены отдельными агрегатами и соединены упругой муфтой (рис. 4).

Благодаря этому тяговый привод Ансальдо Бреда может быть освоен отечественными предприятиями при существующем уровне технологии. Слабое место этого тягового привода — упругая муфта с фторопластовой звездочкой, имеющая низкую долговечность. Как видно из рис. 4, основной причиной невозможности обеспечить достаточную долговечность

муфты в приводе Ансальдо Бреда являются ограниченные габариты для ее размещения при высокой частоте оборотов [9]. Для повышения долговечности муфты необходимо уменьшить осевой габарит АТД, что приведет к снижению его мощности.

Таким образом, можно сделать вывод, что для основных производителей электровозов развитие компоновочных схем тягового привода с бесколлекторными ТЭД при повышении частоты вращения привело к неразрешенному противоречию между требованиями надежности конструкции, с одной стороны, и требованиями технологической простоты — с другой. Соответственно задача поиска новых вариантов компоновки привода сводится к поиску методов разрешения этого противоречия.



Рис. 4. Вид упругой муфты привода Ансальдо Бреда

УТОЧНЕНИЕ УСЛОВИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЭКИПАЖНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВАЗА ЭП20

Исходя из заведомой технологичности привода Ансальдо Бреда, рассмотрим, что препятствует его практической реализации. В тяговом приводе электровоза ЭП20 (рис. 5) имеется значительное расстояние между ТЭД и рамой тележки. Однако уменьшение осевого габарита и увеличение радиального для размещения компенсирующей муфты достаточных габаритов приведет к увеличению массы АТД.

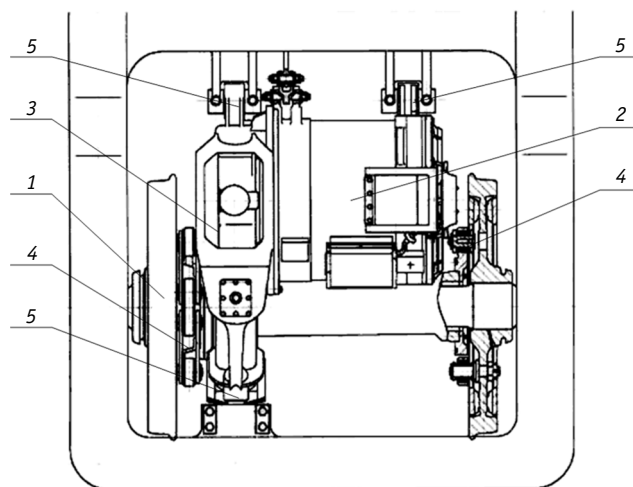


Рис. 5. Тяговый привод электровоза ЭП20:

1 — КМБ; 2 — ТЭД; 3 — редуктор; 4 — шарнирно-поводковые муфты;
5 — резинометаллические шарниры

Таблица 1

Моментомассовые показатели АД

Двигатель	ДТА-450 (проект)	ДТА-1200А	1ТВ 2822-05Е 02	СТА-1200У1 (АД-914У1)	НТА-1200	АД-901УХЛ1
Момент, Нм	8050	5948	6820	10400	8629	8480
Частота вращения, мин ⁻¹	2850	3532	3425	2900	2680	2550
Масса, кг	2200	1960	2900	2400	2400	2300
Удельная масса, кг/Нм	0,273	0,330	0,425	0,231	0,278	0,271

Как видно из табл. 1, моментомассовые показатели АД ухудшаются с увеличением максимальной частоты вращения. Отсюда следует вывод, что снижение массы ТЭД за счет повышения частоты вращения в рамках конструкции с радиальным магнитным потоком себя исчерпало и возможности дальнейшего наращивания мощности следует искать среди решений, позволяющих увеличить моментомассовые характеристики электрической машины.

Известно, что в 1970-х гг. А. С. Курбасов прорабатывал варианты АД электроваз с осевым магнитным потоком (АД с дисковым ротором) [10]. А. С. Курбасовым было доказано, что при числе полюсов больше шести мощность дисковой машины получается существенно выше вследствие увеличения объема активной (зубцовой) зоны. Согласно [10], однодисковые АД при мощности 1200–1300 кВт и наружном диаметре 930 мм по расчетам должны были иметь осевой габарит всего 525–530 мм. Для варианта с сосредоточенными фазами мощностью 1300 кВт, указанного в [10] под названием АД-3, вращающий момент составляет 14,3 кНм при частоте вращения 894 мин⁻¹. Для примененного на ЭП20 двигателя ДТА-1200 мощностью 1200 кВт в часовом режиме вращающий момент равен 6,486 кНм при частоте вращения 1766 мин⁻¹.

С расчетами Курбасова согласуются результаты разработки тяговых электродвигателей электропоезда мощностью 500 кВт, изложенные в [9]. Согласно [9], тяговый электродвигатель с дисковым ротором и поперечным магнитным потоком имеет меньшую на 60 % массу и меньшую на 50 % длину. В настоящее время дисковые электродвигатели создаются для мотор-колес электромобилей, а также для электропоездов [11], освоены серийный выпуск таких двигателей. Например, бельгийская компания Magnax предлагает дисковый двигатель АХF275 пиковой мощностью 500 кВт и пиковым крутящим моментом до 0,5 кНм при массе 25 кг. Британской компанией YASA выпускается двигатель YASA 750 R, имеющий длительную мощность 70 кВт при крутящем моменте 0,4 кНм, массу 37 кг, диаметр 368 мм и осевой габарит 98 мм. Двигатель AF240 американской компании AVID характеризуется номинальным крутящим моментом 0,52 кНм и номинальной мощностью 188 кВт при массе двигателя 80 кг. Таким образом, перечисленные двигатели с аксиальным магнитным потоком имеют удельную массу на единицу длительного момента всего 0,1–0,15 кг/кНм, что вдвое лучше, чем у приведенных в табл. 1 АД классической конструкции.

В связи с тем что в настоящее время новые разработки дисковых ТЭД для электровазов с редукторным приводом не про-

водились, рассмотрим, как может быть изменен привод электроваз ЭП20 при использовании проектного АД-3 [10] для варианта с наименьшей величиной централи тяговой передачи, т.е. в варианте с конструкционной скоростью 160 км/ч.

В этом случае число зубьев малой шестерни в приводе ЭП20 может быть увеличено с 18 до 38. При модуле зубчатых колес, равном 10, центральный передаточный состав 663 мм (по данным аналогичной передачи ЭП2К), а расстояние от корпуса ТЭД до оси — 198 мм. При диаметре оси 210 мм расстояние между ТЭД и поверхностью оси составит 93 мм, что достаточно для размещения конического полого вала при расчетном перемещении оси 40 мм. Таким образом, АД-3 может быть вписан в радиальные габариты колесно-моторного блока. Отметим при этом: АД-3 рассчитывался на мощность 1300 кВт, что на 8 % выше, чем ДТА-1200, и с использованием электроизоляционных материалов, соответствующих уровню отечественной промышленности 40-летней давности.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Благодаря перечисленным свойствам дисковых ТЭД предложен тяговый привод (рис. 6), который лишен недостатков, характерных для рассмотренных выше тяговых приводов.

Предлагаемый тяговый привод имеет агрегатную схему, т.е. его основные агрегаты могут быть собраны и испытаны по отдельности. Поскольку осевые габариты дискового ТЭД меньше, чем у машины с радиальным потоком, появляется достаточно места, чтобы соединить ТЭД и осевой редуктор карданным валом, состоящим из торсионного вала и размещенных по его концам зубчатых муфт, при этом торсионный вал проходит внутри полого вала ТЭД, а зубчатые муфты размещены по обе стороны ТЭД. В приводах, использующих ТЭД с радиальным магнитным потоком, например в приводе электроваз ЭП10, такое решение приводит к ограничению предельной частоты вращения ТЭД, так как диаметр роторных подшипников при полом валу должен быть увеличен по сравнению с цельным валом, что повышает нагрев подшипников. Однако при дисковой конструкции ротора, как уже указывалось, момент на валу ТЭД, по данным [10], в 2,2 раза выше, чем у машины с радиальным потоком, и, таким образом, максимальная частота вращения ТЭД тоже может быть снижена в 2,2 раза, т.е. с 3600 до 1650 об/мин. Известно, что на отечественных электровазах с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором, на которых применялись коллекторные ТЭД с максимальной частотой вращения до 2000 об/мин, проблем с нагревом роторных подшипников не возникало.

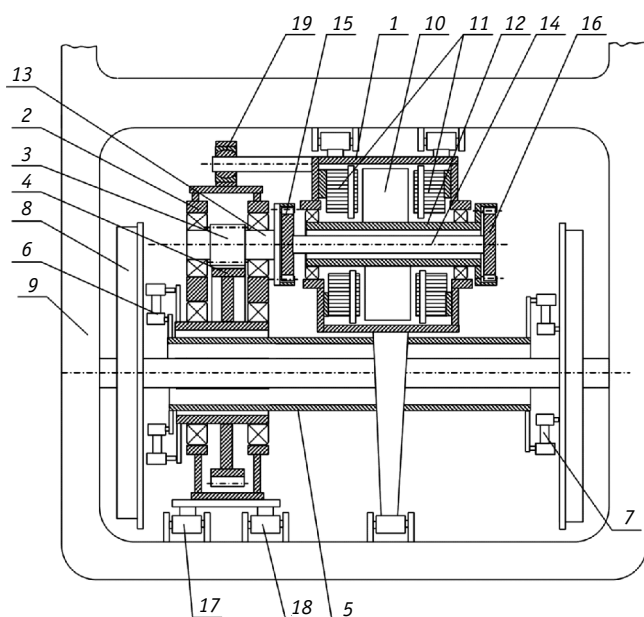


Рис. 6. Предлагаемый тяговый привод агрегатной схемы:

1 — ТЭД; 2 — редуктор; 3 — малое зубчатое колесо; 4 — большое зубчатое колесо; 5 — полый вал; 6, 7 — компенсирующие муфты; 8 — колесная пара; 9 — рама тележки; 10 — ротор ТЭД; 11 — статор ТЭД; 12 — вал ТЭД; 13 — вал малого зубчатого колеса; 14 — торсионный вал; 15, 16 — зубчатые муфты; 17, 18 — точки опоры редуктора на раму тележки; 19 — разъемное подвижное соединение

Редуктор крепится к раме тележки в двух точках со стороны оси. Со стороны вала малого зубчатого колеса корпус редуктора крепится к корпусу ТЭД шарнирным соединением в виде сферического шарнира для уменьшения несоосности валов редуктора и ТЭД. Поскольку в отличие от привода электровазов серии ЭП1 и ЧС2–ЧС8 в данном приводе зубчатые муфты компенсируют только монтажную несоосность валов ТЭД и редуктора, то долговечность зубчатых муфт может быть повышена в несколько раз по сравнению с компенсирующими муфтами электровазов указанных серий.

Торсионный вал служит для демпфирования среднечастотных пульсаций момента от несинусоидальности фазного тока ТЭД, в связи с чем его жесткость не является критическим параметром. В тяговом приводе с полым карданным валом динамический момент в валоприводах в основном определяется возмущениями от галопирования тележки с частотой колебаний примерно 3–5 Гц. Таким образом, желательно, чтобы низшая частота собственных колебаний ротора на податливости торсиона и компенсирующих муфт была не менее чем в 1,4 раза выше частоты галопирования тележки.

Технологичность конструкции предлагаемого привода находится на уровне технологичности привода серийно выпускаемого электроваза ЭП1, привод может быть освоен производством на отечественных локомотивостроительных предприятиях без радикального изменения технологии.

Основная причина, сдерживающая серийный выпуск предлагаемого привода, — отсутствие производства АТД с дисковым ротором. А. С. Курбасов в [10] предлагает изготавливать магнитопроводы таких машин, навитые из рулонной электротехнической стали, при этом, как отмечено в [10], процесс выполнения пазов в навитом магнитопроводе крайних статорных дисков «не привычен для электромашиностроения и потребует поиска технологических решений». С другой стороны, в [10] указывается, что магнитопроводы, навитые из рулонной электротехнической стали, позволяют значительно сократить объем ее отходов при изготовлении. Наконец, даже в случае трудностей создания дискового АТД существуют дисковые синхронные машины с постоянными магнитами и индукторного типа, технология производства которых уже освоена.

Таким образом, целесообразно начать исследования и конструкторские разработки для создания электровазовых ТЭД с осевым магнитным потоком и рассматривать их как направление, ведущее к созданию тягового привода с более высокими показателями, чем у зарубежных фирм «Сименс» и «Альстом».

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы тенденции развития тяговых приводов пассажирских электровазов с АТД зарубежных производителей, показано, что повышение мощности асинхронных ТЭД за счет увеличения частоты вращения приводит к неразрешенному противоречию между требованиями надежности конструкции, с одной стороны, и требованиями технологической простоты — с другой.

2. Рассмотрена компоновка тягового привода на тележке электроваза ЭП20, показано, что использование интегрированной схемы привода вызвано ограничениями осевых габаритов ТЭД, в то время как имеется значительное свободное пространство для увеличения радиальных габаритов. Повышение максимальной частоты вращения ТЭД ведет к ухудшению моментомассовых показателей ТЭД, поэтому дальнейшее наращивание мощности ТЭД может быть достигнуто в первую очередь за счет повышения крутящего момента при той же массе.

3. Установлено, что использование тягового электродвигателя с дисковым ротором (осевым магнитным потоком) позволяет при той же мощности существенно увеличить крутящий момент на валу ТЭД и снизить его осевые габариты. Моментомассовые характеристики тяговых электродвигателей с дисковым ротором, производимых зарубежными фирмами, вдвое превосходят характеристики электровазовых ТЭД.

4. Предложена агрегатная схема опорно-рамного тягового привода на основе ТЭД с дисковым ротором, позволяющая существенно повысить технологичность изготовления и ремонта привода при сохранении его надежности. На данную конструкцию тягового привода подана патентная заявка.

5. Сделан вывод о целесообразности исследований и разработок ТЭД с дисковым ротором (осевым магнитным потоком) для создания тяговых приводов с более высокими показателями, чем зарубежные аналоги.

Литература

1. Применение объектной модели для конструирования тягового привода локомотива / А. С. Космодамианский, Д. Я. Антипин, М. А. Маслов, Д. Н. Шевченко // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 10 (83). С. 39–47. ISSN 1999–8775.
2. Буйносов А. П., Антропов С. Н. Разработка автоматической системы управления тяговым приводом локомотива в условиях внешних возмущающих факторов // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 43–48. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-43-48. ISSN 1815–9400.
3. Воробьев В. И., Измеров О. В., Маслов М. А. Выбор объектной модели тягового привода локомотива // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 6 (59). С. 69–75. ISSN 1999–8775.
4. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Тяговый и вспомогательный привод локомотивов с асинхронными двигателями // Локомотив. 2019. № 3 (747). С. 30–34. ISSN 0869–8147.
5. Киселев В. И. Повышение надежности тяговых электродвигателей локомотивов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 66–67. ISSN 0044–4448.
6. Воробьев В. И., Космодамианский А. С. Агрегатная компоновка тягового привода тепловоза с повышенной нагрузкой на ось // Труды РГУПС. 2018. № 4. С. 33–35. ISSN 1818–5509.
7. Герман-Галкин С. Г., Кузнецов В. А. Оптимизация энергетических характеристик в электроприводе с вентильным двигателем // Вестник УрГУПС. 2017. № 4 (36). С. 77–84. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-4-77-84. ISSN 2079–0392.
8. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Прямое управление моментом асинхронных двигателей при их питании от одного преобразователя частоты // Электротехника. 2015. № 9. С. 29–35. ISSN 0013–5860.
9. Марков А. М. Непосредственный тяговый электропривод локомотива // Труды Псковского политехнического института. 2011. № 15 (3). С. 314–319. ISSN 1813–4742.
10. Курбасов А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. Москва : Транспорт, 1977. 223 с.
11. Две базовые концепции высокоскоростных электропоездов и их сравнительная технико-экономическая оценка / И. В. Гурлов, А. П. Епифанов, А.-Я. Ю. Пармас [и др.] // Известия ПГУПС. 2009. № 1 (18). С. 5–22. ISSN 1815–588X.

References

1. Object model use for locomotive traction drive design [Primenenie ob'ektnoy modeli dlya konstruirovaniya tyagovogo privoda lokomotiva] / A. S. Kosmodamianskiy, D. Ya. Antipin, M. A. Maslov, D. N. Shevchenko // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2019. No. 10 (83). Pp. 39–47. ISSN 1999–8775.
2. Buynosov A. P., Antropov S. N. Development of automatic control system of locomotive traction drive in conditions of external disturbance factors [Razrabotka avtomaticheskoy sistemy upravleniya tyagovym privodom lokomotiva v usloviyakh vneshnikh vozmushhayushih faktorov] // Transport of the Urals. 2019. No. 4 (63). Pp. 43–48. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-43-48. ISSN 1815–9400.
3. Vorobyev V. I., Izmerov O. V., Maslov M. A. Object model of locomotive traction drive [Vybory ob'ektnoy modeli tyagovogo privoda lokomotiva] // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2017. No. 6 (59). Pp. 69–75. ISSN 1999–8775.
4. Kosmodamianskiy A. S., Vorobyev V. I., Pugachev A. A. Traction and auxiliary drive of locomotives with induction motors [Tyagovyy i vspomogatel'nyy privod lokomotivov s asinkhronnymi dvigatelyami] // Locomotive. 2019. No. 3 (747). Pp. 30–34. ISSN 0869–8147.
5. Kiselev V. I. Increase of reliability of locomotive traction electric motors [Povyshenie nadezhnosti tyagovykh elektrodvigatelay lokomotivov] // Railway Transport. 2017. No. 6. Pp. 66–67. ISSN 0044–4448.
6. Vorobyev V. I., Kosmodamianskiy A. S. Aggregate layout for traction drive of the locomotive with increase [Agregatnaya komponovka tyagovogo privoda dlya teplovoza s povyshennoy nagruzkoy na os'] // Works of RGUPS. 2018. No. 4. Pp. 33–35. ISSN 1818–5509.
7. German-Galkin S. G., Kuznetsov V. A. Optimization of power descriptions in electromechanic with valve engine [Optimizatsiya energeticheskikh kharakteristik v elektroprivode s ventilyem dvigatelem] // Herald of USURT. 2017. No. 4 (36). Pp. 77–84. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-4-77-84. ISSN 2079–0392.
8. Kosmodamianskiy A. S., Vorobyev V. I., Pugachev A. A. Direct torque control of induction motors fed by a single frequency converter [Pryamoe upravlenie momentom asinkhronnykh dvigateley pri ikh pitanii ot odnogo preobrazovatelya chastoty] // Russian Electrical Engineering. 2015. No. 9. Pp. 29–35. ISSN 0013–5860.
9. Markov A. M. Direct traction drive for locomotive [Neposredstvennyy tyagovyy elektroprivod lokomotiva] // Works of Pskov State Polytechnic Institute. 2011. No. 15 (3). Pp. 314–319. ISSN 1813–4742.
10. Kurbasov A. S. Improving the working capacity of traction motors [Povyshenie rabotosposobnosti tyagovykh elektrodvigatelay]. Moscow : Transport, 1977. 223 p.
11. Two basic concepts of high-speed electric trains and their comparative technical and economic assessment [Dve bazovye kontseptsii vysokoskorostnykh elektropoezdov i ikh sravnitel'naya tekhniko-ekonomicheskaya otsenka] / I. V. Gurlov, A. P. Epifanov, A.-Ya. Yu. Parmas et al. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2009. No. 1 (18). Pp. 5–22. ISSN 1815–588X.

Объем статьи 0,78 авторских листа

УДК 629.4.077: 629.4.087

Юрий Владимирович Кривошея, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Донецкого института железнодорожного транспорта (ДОНИЖТ), Донецк, Донецкая Народная Республика,
Татьяна Леонидовна Риполь-Сарагоси, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия

КОНСТРУКТОРСКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ФРИКЦИОННОГО ТОРМОЗА

Yuriy Vladimirovich Krivosheya, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Donetsk Railway Transport Institute (DRTI), Donetsk, Donetsk People Republic,
Tatyana Leonidovna Ripol-Saragosi, DSc in Engineering, Professor, Head of Heat Power Engineering in the Railway Transport Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia

Construct and energy reserves improvement of exploitative properties rail friction brake

Аннотация

В статье дается оценка конструкторско-энергетическим резервам улучшения эксплуатационных свойств железнодорожного фрикционного тормоза в условиях существующих массогабаритных ограничений и роста энергии торможения. Критерием оценки эксплуатационных свойств фрикционного тормоза приняты коэффициент трения и энергонагруженность контакта. Приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи фрикционных характеристик дискового тормоза и влияющих конструктивных и нагрузочно-скоростных факторов. Предложены варианты конструкции железнодорожных фрикционных тормозов, которые обеспечивают улучшение эксплуатационных характеристик. Выполнена сравнительная аналитическая оценка энергонагруженности контакта новых вариантов фрикционных тормозов и классического дискового тормоза.

Ключевые слова: дисковый фрикционный тормоз, энергоемкость, кольцевая тормозная накладка, тормозной диск, тормозной барабан, коэффициент трения, энергонагруженность контакта трибосопряжения.

Summary

The paper gives an assessment of the design and energy reserves for improving the operational properties of the railway friction brake under the existing mass-dimensional restrictions and the growth of braking energy. The criterion for assessing the operational properties of the friction brake is the friction coefficient and contact energy load. The results of experimental studies of the relationship between the frictional characteristics of the disc brake and the affecting structural and load-speed factors are presented. Design options for railway friction brakes are proposed that provide improved performance. A comparative analytical assessment of the contact energy load of new friction brake and classic disc brake options has been performed.

Keywords: disc friction brake, energy intensity, annular brake lining, brake plate, brake drum, friction coefficient, energy load tribo-conjugation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-26-30

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время максимальные скорости движения поездов на железных дорогах мира достигают 350–380 км/ч [1]. В этих условиях тормозная система становится одним из главных средств обеспечения безопасности движения.

На подвижном составе железных дорог используется несколько видов тормозов: фрикционные (дисковые, колодочные, магниторельсовые), электродинамические и токовыхревые. Фрикционные тормоза (дисковые и колодочные) в связи с простотой конструкции, эффективностью и надежностью являются основными средствами торможения.

Однако в современных условиях железнодорожные фрикционные тормоза, в том числе дисковые и колодочные, практически исчерпали резервы повышения эффективности, прежде всего по критериям коэффициента трения и энергонагруженности контакта рабочих элементов [2, 3]. Это объясняется массогабаритными ограничениями узлов и систем экипажной части подвижного состава, регламентируемыми ГОСТом 9238–2013 [4].

Поэтому целью исследования, которое рассматривается в данной статье, стал поиск новых технических и конструктивных решений, обеспечивающих повышение эффективности железнодорожных фрикционных тормозов в условиях массогабаритных ограничений и роста энергии торможения, а также оценка эффективности указанных решений по критериям коэффициента трения и энергонагруженности контакта рабочих элементов фрикционного тормоза.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование выполнено на специально сконструированном и изготовленном стенде [5]. В качестве силовой схемы взаимодействия рабочих элементов принята схема дискового тормоза (рис. 1), в котором с тормозным диском взаимодействуют тормозные накладки в форме кольца.

Для реализации эксперимента была спроектирована и изготовлена тормозная колодка, по периферии которой размещены сегменты тормозных накладок (см. рис. 1), образующих кольцо. Между сегментами тормозных накладок предусматривался зазор для вывода продуктов износа из рабочей зоны.

За счет варьирования количеством сегментов достигалось необходимое соотношение площади контакта тормозных накладок с тормозным диском (коэффициент взаимного перекрытия $K_{ВП}$). Эксперименты проведены для коэффициентов взаимного перекрытия $K_{ВП}$ равных 0,33, 0,66 и 0,98. Сила прижатия тормозных накладок к тормозному диску составляла 1,5 кН. В ходе экспериментов осуществлялось одностороннее прижатие тормозных накладок к тормозному диску (рис. 2). Сила трения рабочих элементов стенда измерялась методом тензометрии.

Площадь контакта рабочих элементов дискового тормоза составляла 8 % от площади тормозного диска, которая используется для рассеивания тепловой энергии в окружающую среду. В данном случае тормозной диск имел возможность рассеивать аккумулированную энергию в окружающую среду с высокой эффективностью. Это позволяло минимизировать воздействие температуры, обусловленной коэффициентом взаимного перекрытия $K_{ВП}$ на фрикционные процессы.

Влияние $K_{ВП}$ на тепловое состояние тормозного диска оценивалось по уровню температуры, которая достигала своей стабилизации для конкретных условий взаимодействия.

При проведении экспериментов на стенде контролировались следующие параметры:

- температура поверхности тормозного диска;
- сила трения при взаимодействии рабочих элементов стенда;
- частота вращения тормозного диска;
- сила прижатия тормозной накладки к тормозному диску;
- коэффициент взаимного перекрытия $K_{ВП}$.

Суть экспериментов заключалась в определении силы трения при взаимодействии тормозных накладок и тормозного диска в зависимости от коэффициента взаимного перекрытия $K_{ВП}$ и частоты вращения тормозного диска. Сила трения замерялась в момент, когда температура тормозного диска стабилизировалась.

По данным экспериментов построены зависимости коэффициента трения от $K_{ВП}$ для частот вращения тормозного диска, равных 360, 646 и 1007 об/мин (рис. 3).

Результаты расчета энергонагруженности контакта традиционного дискового тормоза, а также конструктивных вариантов фрикционных тормозов, которые имеют коэффициент взаимного перекрытия $K_{ВП}$ равный 1,0, и соответствуют существующим массогабаритным ограничениям экипажной части подвижного состава, представлены на рис. 4.

Расчеты выполнены согласно [6] при условии постоянства энергии торможения, подведенной к фрикционному тормозу. При этом энергонагруженность трактовалась как отношение энергии торможения к площади контакта рабочих элементов дискового тормоза.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при минимизации влияния температуры в области контакта тормозных накладок и тормозного диска представляется возможным воздействовать на коэффициент трения дискового тормоза за счет коэффициента взаимного перекрытия $K_{ВП}$. При $K_{ВП} = 0,98$ коэффициент трения примерно на 8–10 % больше, чем у дискового тормоза, $K_{ВП}$ которого равен 0,33.

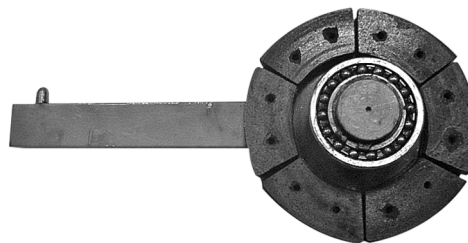


Рис. 1. Тормозная колодка с размещенными на ней тормозными накладками

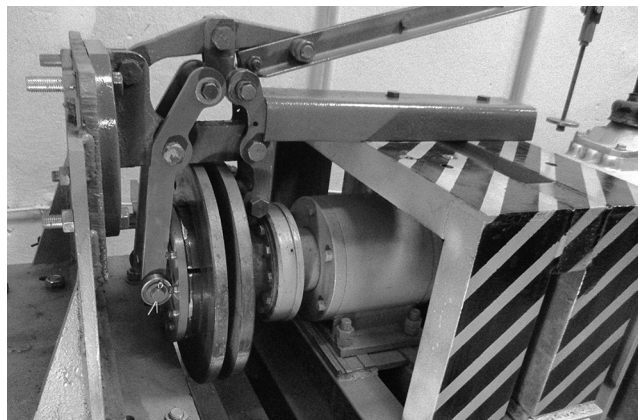


Рис. 2. Силовое прижатие кольцевой тормозной накладки к тормозному диску

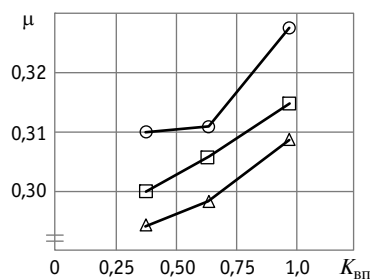


Рис. 3. Влияние коэффициента взаимного перекрытия на коэффициент трения дискового тормоза:
○ — 360 об/мин; □ — 646 об/мин; △ — 1007 об/мин

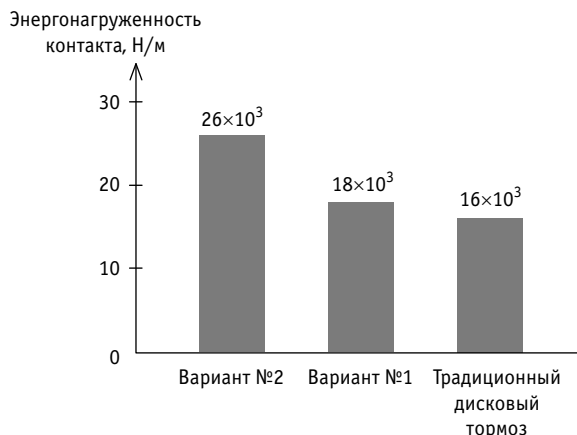


Рис. 4. Энергонагруженность контакта традиционного дискового тормоза и предложенных конструкций железнодорожных фрикционных тормозов

Как следует из рис. 4, повышение $K_{вп}$ позволяет более чем в два раза снизить энергонагруженность контакта рабочих элементов дискового тормоза в пределах одних и тех же габаритных ограничений, что благоприятно сказывается на реализации фрикционных процессов трения и изнашивания рабочих поверхностей тормозных накладок и тормозного диска.

Повышение коэффициента $K_{вп}$ до значений, близких 1,0, дает возможность существенно нивелировать термические деформации поверхности тормозного диска, возникающие у классического дискового тормоза ($K_{вп} = 0,25$) из-за того, что тормозные накладки создают над частью поверхности тормозного диска своеобразный тепловой экран, который препятствует его равномерному охлаждению на стоянках подвижного состава. В результате это приводит к геометрическим дефектам рабочей поверхности. При $K_{вп} = 1,0$ тормозная накладка способствует равномерному охлаждению тормозного диска.

Кроме того, увеличение $K_{вп}$ и, как следствие, снижение давлений в области взаимного контакта позволяет получить преимущества, которые напрямую не вытекают из результатов экспериментов, но имеют под собой весомые основания. В результате снижения механических давлений в контакте рабочих элементов дискового тормоза уменьшается интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей и снижается уровень их тепловой напряженности [7, 8].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ФРИКЦИОННЫХ ТОРМОЗОВ

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие цели совершенствования конструкции железнодорожного фрикционного тормоза:

- повышение коэффициента трения;
- снижение давлений в области контакта рабочих элементов дискового тормоза;
- эффективное охлаждение рабочих элементов дискового тормоза;
- нивелирование термических деформаций поверхности тормозного диска.

Как показано выше, достижение поставленных целей возможно за счет увеличения коэффициента $K_{вп}$ до значений, близких к 1,0, при условии интенсификации охлаждения рабочих элементов дискового тормоза.

В соответствии с этим предложены два варианта конструкции фрикционного тормоза (рис. 5, 6), которые защищены патентами [6, 9] на полезные модели и способствуют достижению вышеперечисленных целей. Оба варианта характеризуются увеличением $K_{вп}$ до значений, близких к 1,0, а также повышением интенсивности охлаждения рабочих элементов дискового тормоза.

Дисковый тормоз первого варианта (см. рис. 5) состоит из тормозного диска 1, тормозных колодок 2, тормозных накладок 3, рычагов 4, механизма нагружения 5, шарниров 6 и ребер 7 для интенсификации охлаждения. В этой конструкции тормозные колодки и тормозные накладки имеют форму кольца.

К механизму нагружения 5 дискового тормоза посредством шарниров 6 присоединены тяги 4, противоположные концы которых также соединены шарнирами 6 и имеют непосредственное присоединение к раме тележки. К рычагам 4 с помощью шарниров 6 присоединены кольцевые тормозные колодки 2, на которых закреплены кольцевые тормозные накладки 3.

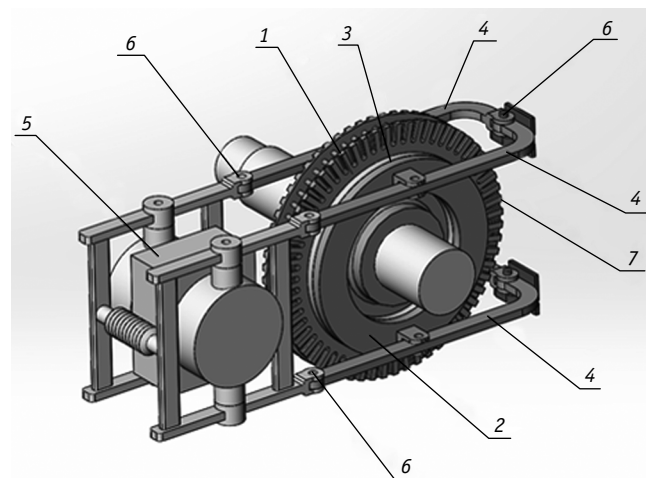


Рис. 5. Дисковый тормоз (первый вариант):
 1 — тормозной диск; 2 — кольцевая тормозная колодка;
 3 — кольцевая тормозная накладка; 4 — рычаг;
 5 — механизм нагружения; 6 — шарнир; 7 — ребра

Кольцевая форма тормозной колодки 2 предполагает обеспечение необходимой жесткости для равномерного прижатия тормозных накладок 3 к тормозному диску 1, что достигается конструктивными средствами.

Увеличение $K_{вп}$ неизменно приведет к ухудшению условий теплообмена, что объясняется уменьшением свободной от контакта рабочей площади тормозного диска, которая в классическом дисковом тормозе используется для отвода тепла в окружающую среду.

Следовательно, необходимо компенсировать потерю свободной от контакта площади тормозного диска. Это достигается тем, что тормозные накладки 3 занимают примерно по-

ловину рабочей площади тормозного диска 1 за счет уменьшения наружного диаметра кольцевых тормозных накладок. Несмотря на уменьшение наружного диаметра тормозной накладки, ее рабочая площадь с тормозным диском почти в два раза превышает аналогичную площадь классического дискового тормоза.

В результате по периферии тормозного диска 1 высвобождается часть площади, которую можно использовать для организации ребер 7, предназначенных для интенсификации процесса отвода тепла в окружающую среду. За счет ребер 7 не только компенсируется потеря свободной площади, но и (по предварительным расчетам) достигается ее увеличение на 10–15 % по сравнению с классическим дисковым тормозом.

Предложенная компоновка дискового тормоза позволяет сохранить традиционный механизм нагружения 5 практически без изменений, что упрощает адаптацию конструкции тормоза к экипажной части подвижного состава. К конструкции тормоза легко адаптируется и существующая система вентиляции тормозного диска. Ко всему прочему данный дисковый тормоз можно устанавливать как на оси свободной колесной пары, так и на оси колесной пары с тяговым двигателем. В этом случае традиционно используются два тормозных диска, прикрепленных с двух сторон колесного центра.

Вторая конструкция фрикционного тормоза (см. рис. 6) характеризуется использованием тормозной ленты, что оправдывает его название — ленточный тормоз.

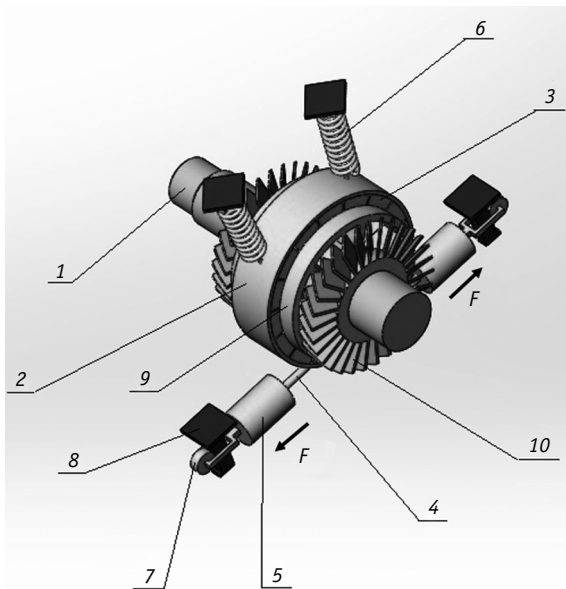


Рис. 6. Ленточный фрикционный тормоз (второй вариант):

- 1 — ось колесной пары; 2 — тормозная колодка;
3 — тормозная накладка; 4 — штоки; 5 — устройство нагружения;
6 — пружинный подвес; 7 — ролики; 8 — точка крепления;
9 — тормозной барабан; 10 — вентиляторные лопасти

Тормозной барабан 9 ленточного фрикционного тормоза состоит из полых барабанных колец, которые напрессовываются на ось колесной пары. Количество колец выбирается

в зависимости от уровня подводимой к тормозу энергии торможения, реализуемой при эксплуатации конкретного типа подвижного состава.

При торможении тормозной барабан 9 взаимодействует с тормозной лентой 2, с внутренней стороны которой закреплены секционные тормозные накладки 3.

Тормозная лента 2 соединена с рамой тележки при помощи пружинного подвеса 6, который обеспечивает отвод тормозной колодки 2 от тормозного барабана 9 при прекращении торможения.

Использование полых барабанных колец позволяет обеспечить принудительное охлаждение тормозного барабана 9 за счет вентиляторных лопастей 10, жестко закрепленных на оси 1 колесной пары по обе стороны тормозного барабана 9. Лопасти барабана загнуты идентично, что позволяет одним лопастям выполнять функцию нагнетательного вентилятора, а вторым — вытяжного, независимо от направления движения поезда.

Прижатие тормозных накладок 3 к тормозному барабану 9 осуществляется с помощью устройств нагружения 5, которые за счет штоков 4 воздействуют на тормозную колодку 2. Устройства нагружения 5 перемещаются по опорам 8 с помощью роликов 7, что препятствует блокировке первой ступени рессорного подвешивания при торможении.

Силовой привод фрикционного тормоза выполняет рычажная передача (на рис. 6 не показана) по аналогии с тем, как это происходит в известном колодочном железнодорожном тормозе. Ленточный фрикционный тормоз предназначен для использования на колесных парах, свободных от тягового двигателя.

ВЫВОДЫ

1. Фрикционные тормозные системы являются одним из главных факторов, влияющих на безопасность движения поездов. Увеличение скоростей движения предполагает дальнейшее совершенствование эксплуатационных качеств железнодорожных фрикционных тормозов подвижного состава.

2. В условиях массогабаритных ограничений узлов и систем экипажной части подвижного состава и роста энергии торможения улучшение эксплуатационных свойств железнодорожного фрикционного тормоза возможно по двум направлениям совершенствования его конструкции:

- увеличение коэффициента взаимного перекрытия $K_{вп}$;
- улучшение охлаждения рабочих элементов узла трения.

3. Выполненные эксперименты и проведенные расчеты показали, что при увеличении коэффициента взаимного перекрытия до значений, близких к 1,0, представляется возможным повысить коэффициент трения дискового тормоза на 8–10 %, снизить энергонагруженность контакта рабочих элементов дискового тормоза в два и более раз (в зависимости от конструктивных особенностей фрикционных тормозов), а также способствовать снижению уровня термических деформаций поверхности тормозного диска.

4. Предложены два варианта конструкции фрикционных железнодорожных тормозов, которые характеризуются значениями $K_{вп}$, близкими к 1,0.

Литература

1. Новый мировой рекорд скорости на рельсах. URL: <https://habr.com/ru/post/374951/> (дата обращения: 05.04.2020).
2. Ehlers H.-R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake // Glasers Annalen. 2002. No. 6/7. Pp. 290–300.
3. Schlosser W., Aurich S. Die modernen Bremssysteme // Glasers Annalen. 2001. No. 8. Pp. 273–277.
4. ГОСТ 9238–2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Москва : Стандартинформ, 2014. 177 с.
5. Стенд для дослідження дискового гальма високошвидкісного складу залізниць / Ю. Ю. Осенін, О. В. Сергієнко, І. І. Соснов [і ін.] // Вісник Східноукраїнського національного університету. ім. В. Даля. 2013. № 2 (191). Ч. 2. С. 99–103. ISSN 1998–7927.
6. Дисковое гальмо / Ю. І. Осенін, Ю. В. Кривошея, Л. І. Антошкіна, В. В. Бугаєнко : патент України на корисну модель № 139445 ; заявл. 22.05.19; публікація відомостей про видачу патенту 10.01.20, Бюл. № 1.
7. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Т. 3. Москва : Машиностроение, 1992. 400 с.
8. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин : справочник. Москва : Машиностроение, 1984. 280 с.
9. Фрикційне гальмо / Ю. І. Осенін, Ю. В. Кривошея, Л. І. Антошкіна [і ін.] : патент України на корисну модель № 136742 ; заявл. 04.04.19 ; публікація відомостей про видачу патенту 27.08.19, Бюл. № 16.

References

1. A new world record for speed on rails [Novyy mirovoy rekord skorosti na rel'sakh]. URL: <https://habr.com/ru/post/374951/> (access date: 05.04.2020).
2. Ehlers H.-R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake // Glasers Annalen. 2002. No. 6/7. Pp. 290–300.
3. Schlosser W., Aurich S. Die modernen Bremssysteme // Glasers Annalen. 2001. No. 8. Pp. 273–277.
4. GOST 9238–2013. Construction and rolling stock clearance diagrams [Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroeniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 177 p.
5. A stand for the study of the disc brake of high-speed rail composition [Stend dlya issledovaniya diskovogo tormoza vysokoskorostnogo sostava zheleznykh dorog] / Yu. Yu. Osenin, O. V. Sergienko, I. I. Sosnov et al. // Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. 2013. No. 2 (191). Part 2. Pp. 99–103. ISSN 1998–7927.
6. Disc brake [Diskovyy tormoz] / Yu. I. Osenin, Yu. V. Krivosheya, L. I. Antoshkina, V. V. Bugaenko : patent for utility model No. 139445 Ukraine; filed 22.05.19 ; publ. 10.01.20, Bulletin No. 1.
7. Handbook of tribotechnology [Spravochnik po tribotekhnike] / Ed. by M. Khebda, A. V. Chichinadze. Vol. 3. Moscow : Machinery, 1992. 400 p.
8. Kragelskiy I. V., Mikhin N. M. Knots of friction of machines [Uzly treniya mashin] : handbook. Moscow : Machinery, 1984. 280 p.
9. Friction brake [Friksionnyy tormoz] / Yu. I. Osenin, Yu. V. Krivosheya, L. I. Antoshkina et al. : patent for utility model No. 136742 Ukraine; filed 04.04.19 ; publ. 27.08.19, Bulletin No. 16.

Объем статьи 0,56 авторских листа

УДК 681.518.5:004.052.32

Алексей Николаевич Ковкин, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

РЕЛЕЙНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КОММУТАЦИЯ ЦЕПЕЙ В БЕЗОПАСНЫХ УСТРОЙСТВАХ СОПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

Alexey Nikolaevich Kovkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Automation and Telemechanics on the Railway Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Relay-semiconductor circuit switching in safe interface units based on electromagnetic relays

Аннотация

В статье рассмотрены способы практической реализации принципа релейно-полупроводниковой коммутации цепей в системах железнодорожной автоматики с применением перспективной элементной базы. Даны рекомендации по выбору полупроводниковых коммутационных элементов для различных областей применения релейных устройств сопряжения с объектами.

Ключевые слова: устройства сопряжения с объектами, релейно-полупроводниковая коммутация, биполярные транзисторы с изолированным затвором, оптоэлектронные реле.

Summary

The paper considers methods of realization of relay-semiconductor circuit switching in systems of railway automatics with the use of promising elemental base. It also gives recommendations on selection of semiconductor switching elements for various spheres of application of relay interface units.

Keywords: interface units, relay-semiconductor switching, isolated gate bipolar transistors, optoelectronic relay.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-31-35

ВВЕДЕНИЕ

Устройства сопряжения с объектами (УСО) в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики, осуществляющих непосредственное управление стрелками и сигналами, должны исключать возникновение опасных ситуаций при отказах элементов. Достигается это за счет введения избыточности, программно-аппаратного контроля исправности коммутационных элементов, а также использования компонентов и схемных решений с однонаправленной характеристикой отказов [1]. По виду используемой элементной базы различают релейные и бесконтактные устройства сопряжения. Неудовлетворительные габаритные характеристики и низкая технологичность УСО на основе реле первого класса надежности являются причиной повышенного внимания специалистов к бесконтактным схемотехническим решениям. В то же время следует понимать, что бесконтактные устройства сопряжения не свободны от недостатков. Реализация безопасного сопряжения путем тестирования полупроводниковых ключей требует привлечения дополнительных программных и аппаратных ресурсов. Непростой задачей является осуществление гарантированного отключения питания объектов при обнаружении отказов.

При построении бесконтактных УСО на основе мощных функциональных преобразователей с несимметричным отказом разработчики также сталкиваются с рядом специфических проблем. В первую очередь следует отметить наличие существенных потерь в процессе преобразования электрической энергии. Невысокий КПД преобразовательных схем приводит не только к перерасходу электроэнергии, но и к значительному тепловыделению. Это, в свою очередь, накладывает ограничения на плотность размещения оборудования и требует принятия дополнительных мер для отвода тепла. Кроме того, преобразовательные схемы обычно формируют напряжения прямоугольной формы, которые характеризуются значительным уровнем высокочастотных гармоник. Наличие гармоник проявляется при работе оборудования на протяженных кабельных линиях и вынуждает принимать специальные меры для снижения взаимных влияний между цепями [2].

Перечисленные недостатки бесконтактных УСО являются причиной того, что концепция релейного сопряжения с объектами не теряет актуальности. Причем особый интерес представляют решения, основанные на использовании малогабаритных реле, не имеющих признаков приборов первого класса надежности [3]. Безопасность в этом случае обеспечивается путем дублирования реле и контроля фактического размыкания контактов в цепи управления объектами. Для достоверности контроля размыкания контактов используются специальные серии реле с жестко связанными контактными группами (safety relay), позиционируемые зарубежными производителями реле в качестве элементной базы для реализации управления ответственным технологическим оборудованием. Применение подобной элементной базы в современных разработках оправданно по причине малых габаритов указанных реле, а также в силу того, что в ассортименте многих производителей присутствуют изделия, предназначенные для использования в печатном монтаже.

Одна из основных задач, решаемых в ходе разработки релейных схем управления, — обеспечение требуемого ресурса аппаратуры. Приемлемый срок службы релейных устройств управления светофорами или иными устройствами небольшой мощности может быть обеспечен за счет малой электрической нагрузки на контактную систему. В случае управления мощными исполнительными объектами, такими как двигатели стрелочных приводов, приходится искать другие пути увеличения ресурса, и наиболее эффективным способом следует считать релейно-полупроводниковую коммутацию цепи исполнительного объекта (РПК), обеспечивающую бестоковое переключение контактов. Схемы РПК образуются путем последовательного соединения полупроводникового коммутационного элемента и релейных контактов. Устройства формирования управляющих сигналов обеспечивают открытие полупроводникового коммутационного элемента после замыкания контактов реле и закрытие полупроводникового ключа до начала размыкания контактов. В подобных схемах электромагнитное реле реализует безопасность управления исполнительным объектом, гарантированно размыкая электрическую цепь, а полупроводниковый элемент коммутирует ток, обеспечивая повышение количества срабатываний схемы до уровня механического ресурса реле.

Идея совместной коммутации цепей релейными контактами и полупроводниковыми приборами не нова. Принцип РПК использован в блоках СГ-76У, предназначенных для управления приводами горючих стрелок [4]. В данном устройстве коммутация тока двигателя реализована с помощью тиристоров. Целесообразность использования такого технического решения в новых разработках вызывает сомнения. Во-первых, тиристоры относятся к классу однооперационных приборов, остающихся в открытом состоянии после снятия управляющего сигнала. В случае управления нагрузками постоянного тока указанная особенность значительно усложняет схемные решения и снижает эксплуатационную надежность аппаратуры. Кроме того, большая величина тока в цепях управления тиристорами затрудняет электрическое согласование данных полупроводниковых приборов с микропроцессорными устройствами.

Поэтому значительный интерес представляют вопросы реализации схем РПК на основе современных достижений в области полупроводниковой элементной базы.

РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ РЕЛЕЙНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ КОММУТАЦИИ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

В современной энергетической электронике для управления нагрузками мощностью порядка нескольких киловатт успешно применяются транзисторы с изолированным затвором [5, 6]. Основным достоинством таких полупроводниковых приборов является минимальное потребление мощности от источника управляющих сигналов при значительных величинах коммутируемых токов и напряжений, что исключает необходимость построения многокаскадных силовых схем и позволяет использовать для управления ключами относительно несложные схемные решения, реализуемые в микросхемотехнике. Для управления нагрузками с невысоким рабочим напряжением (порядка нескольких десятков вольт) эффективным решением является использование полевых транзисторов с изолированным затвором. Данные транзисторы обозначаются аббревиатурой МДП (металл диэлектрик полупроводник). В зарубежной литературе используется обозначение MOSFET — сокращение от двух английских словосочетаний: Metal Oxide Semiconductor (металл окисел полупроводник) и Field Effect Transistors (транзистор, управляемый электрическим полем). Лучшие образцы МДП-транзисторов с максимальным напряжением сток-исток 100 В способны коммутировать токи до 100 А. Существуют МДП-транзисторы с максимальными напряжениями сток-исток до 1000 В. Однако при значительных величинах максимального напряжения многократно возрастает сопротивление канала открытого транзистора, что приводит к резкому росту потерь и, как следствие, уменьшению допустимого тока нагрузки.

Поэтому для устройств управления объектами, рабочее напряжение которых измеряется сотнями вольт, целесообразно использовать биполярные транзисторы с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistors, или IGBT). Такие транзисторы сочетают в себе положительные качества полевых и биполярных приборов. При величинах максимального напряжения коллектор-эмиттер от 400 В и более IGBT характеризуются меньшей по сравнению с МДП-транзистором величиной потерь проводимости. На сегодняшний день получили распространение IGBT в корпусе TO-247, способные коммутировать токи до 50 А при максимальном напряжении коллектор-эмиттер 600 В [7]. В результате данный класс приборов оказывается оптимальным решением для работы в цепях с номинальным напряжением порядка нескольких сотен вольт и, в частности, является наиболее подходящим вариантом для управления двигателями стрелочных электроприводов на железнодорожном транспорте.

Пример реализации схемы РПК на основе транзисторов показан на рис. 1. В рассматриваемой схеме реализовано безопасное управление объектом с помощью двух электромагнитных реле, обмотки которых получают питание от функционального преобразователя (ФП) с несимметричным отказом. Замы-

кание и размыкание цепи, подготовленной контактами реле, осуществляется с помощью IGBT. Если нагрузка имеет индуктивный характер, необходимо обеспечивать защиту ключа от повреждения в результате воздействия электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции. Защиту целесообразно осуществлять путем подключения диода, варистора или RC-цепи параллельно нагрузке. При таком решении наличие защитной цепи не приводит к задержке прерывания тока через релейные контакты при запираии ключа. Управление транзистором производится отдельным сигналом, формируемым вычислительными средствами. Поскольку работа полупроводникового ключа должна быть жестко синхронизирована с работой электромагнитных реле, задача формирования соответствующих сигналов может быть возложена лишь на программное обеспечение нижнего уровня в составе интерфейсной части УСО.

Время задержки открытия полупроводникового ключа t_{30} определяется с учетом продолжительности дребезга релейных контактов и должно удовлетворять неравенству

$$t_{30} > t_{CP} + t_{ДР},$$

где t_{CP} и $t_{ДР}$ — время срабатывания реле и время дребезга контактов соответственно, мс.

В качестве примера, отражающего реальные значения временных параметров, можно рассмотреть мощное электромагнитное реле 66-й серии (производство итальянской компании Finder) с номинальным током контактов 30 А [8]. Это реле в зависимости от варианта исполнения характеризуется временем срабатывания от 8 до 15 мс. Согласно технической документации, время дребезга контактов при включении реле может достигать 7 мс. Таким образом, время задержки открытия полупроводникового ключа в случае использования указанных реле должно иметь величину более 22 мс. Время включения и выключения силовых транзисторов измеряется сотнями наносекунд, что на несколько порядков меньше времени срабатывания и выключения реле. Поэтому временные параметры полупроводникового прибора при разработке схемы РПК не учитываются, и запираение транзистора в процессе выключения нагрузки осуществляется в момент снятия напряжения с обмоток реле.

Для электрического согласования вычислительных устройств с управляющим выводом силового ключа, а также для гальванической развязки силовых цепей и выходов вычислительных средств могут использоваться относительно несложные согласующие схемы (СС). Такой вариант реализации РПК характеризуется простотой схемотехнических решений, однако требует привлечения дополнительных ресурсов вычислительного комплекса, что не всегда оправданно. На рис. 2 показано иное техническое решение, в котором управляющий сигнал для транзистора формируется под воздействием выходного напряжения ФП без участия вычислительных средств. Поскольку транзистор должен открываться с задержкой относительно момента замыкания релейных контактов, в данном решении предусмотрена схема задержки включения (СЗВ).

Реализация транзисторных схем РПК в цепях переменного тока возможна путем включения полупроводникового ком-

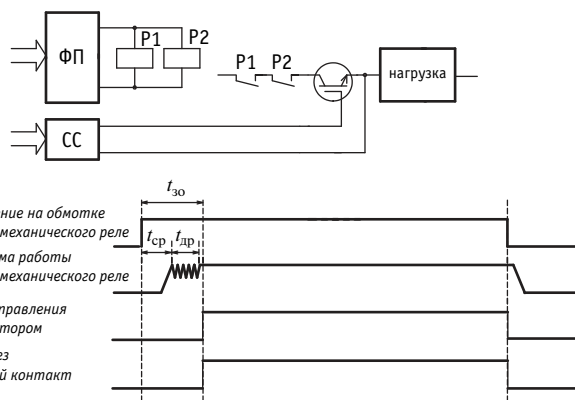


Рис. 1. Транзисторная схема РПК

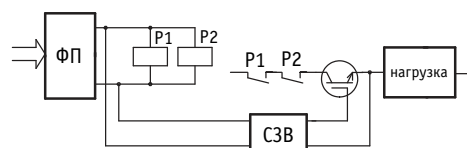


Рис. 2. Вариант транзисторной схемы РПК с аппаратной реализацией управления полупроводниковым ключом

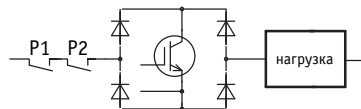


Рис. 3. Управление нагрузками переменного тока с помощью схемы РПК на основе транзистора

мутационного элемента в цепь нагрузки с помощью диодного моста (рис. 3). В этом случае потребуются схема управления транзистором, обеспечивающая привязку управляющих импульсов к потенциалу эмиттера, что усложняет схемотехнические решения. Помимо более сложной схемы управления полупроводниковым ключом, недостатком данного решения является большое количество силовых полупроводниковых приборов и, как следствие, относительно высокая стоимость и значительные потери энергии.

РЕЛЕЙНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КОММУТАЦИЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИЛОВЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

При необходимости управления нагрузками переменного тока представляют интерес схемы РПК, построенные на основе оптоэлектронных реле. В силовой электронике используются оптоэлектронные реле, ключевой элемент которых представляет собой полевой транзистор, а также приборы, построенные на основе симметричных тиристорных (симисторных) полупроводниковых структур. Первые позволяют коммутировать постоянные и переменные токи величиной 0,7–2,0 А при напряжениях от 60 до 400 В (чем больше максимальное напряжение, тем меньше максимальный ток). Вторые предназначены для управления исключительно нагрузками переменного тока при номинальном напряжении цепи 250 В [7]. Максимальная

величина тока, коммутируемого симисторными оптоэлектронными реле, может достигать 40 А.

Достоинством схем на основе оптоэлектронных реле является простота управляющей схемотехники, поскольку оптоэлектронные реле обеспечивают гальваническую развязку между силовой цепью и источником управляющего сигнала. Кроме того, светодиод оптоэлектронного реле можно подключать непосредственно к выходам современных микроконтроллеров без использования согласующих схем. Пример схемы на основе симисторного оптоэлектронного реле показан на рис. 4. В отличие от транзистора, время открытия и закрытия оптоэлектронного реле соизмеримо с временем срабатывания и выключения электромагнитных реле. Запирание симисторной полупроводниковой структуры всегда происходит в момент перехода тока через нулевое значение, а значит, максимальное время выключения оптоэлектронного реле при коммутации цепей с переменным током 50 Гц составляет 10 мс. Следует отметить, что данное свойство симисторной структуры имеет и положительную сторону. Поскольку разрыв цепи происходит при нулевом значении тока, нет необходимости осуществлять защиту ключа при управлении индуктивной нагрузкой. Возвращаясь к вопросу быстродействия, обратим внимание, что мощные оптоэлектронные реле, как правило, содержат встроенную схемотехнику, обеспечивающую отпирание полупроводниковой структуры в момент перехода напряжения через нулевое значение. Из этого следует, что и время включения оптоэлектронного реле тоже может достигать 10 мс. Если применяется оптоэлектронное реле на основе полевых транзисторов, время включения и выключения полупроводниковой структуры также велико и для мощных приборов составляет 15–20 мс. Низкое быстродействие оптоэлектронных реле необходимо учитывать в процессе выключения нагрузки, обеспечивая задержку выключения электромагнитного реле $t_{ЗВ}$ относительно момента снятия управляющего сигнала с оптоэлектронного реле. Очевидно, что продолжительность задержки выключения должна превышать максимальное время запирания полупроводниковой структуры в составе оптоэлектронного реле $t_{ВЫКЛ}$.

При необходимости управление оптоэлектронным реле в схеме РПК также может быть реализовано аппаратными средствами. Пример подобной схемы приведен на рис. 5. В данном схемотехническом решении задержка выключения реле реализована с помощью конденсатора, включенного параллельно обмоткам реле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Схемы РПК на основе транзисторов являются удачным решением для цепей постоянного тока, особенно если учесть, что стоимость мощных транзисторов значительно ниже стоимости оптоэлектронных реле, имеющих аналогичные величины коммутируемого тока и напряжения. Применение транзисторов в цепях переменного тока приводит к существенному усложнению схем, и такое решение должно иметь веское обоснование. Общим недостатком схем РПК на основе оптоэлектронных реле следует считать относительно невысокое быстродействие. Фактически время включения и выключения нагрузки приблизительно в два раза превышает время

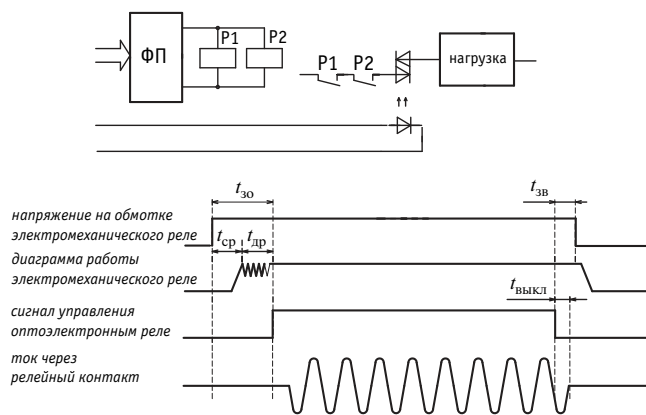


Рис. 4. Схема РПК для цепи переменного тока на основе симисторного оптоэлектронного реле

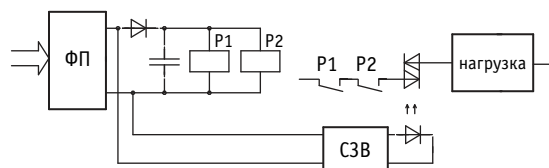


Рис. 5. Вариант схемы РПК с аппаратной реализацией временных задержек

срабатывания и выключения электромагнитных реле. Кроме того, приборы на основе тиристорных структур нецелесообразно использовать для управления объектами, работающими на постоянном напряжении, поскольку в цепях постоянного тока достаточно сложно реализовать запирание таких полупроводниковых ключей. Оптоэлектронные реле на основе полевых транзисторов пригодны для управления нагрузками, работающими на постоянном напряжении, но не способны коммутировать значительные токи. Таким образом, если требуется обеспечивать максимально быстрое включение и выключение управляемого объекта или объект работает на постоянном токе, следует отдавать предпочтение схемам РПК на транзисторах. Коммутационная способность оптоэлектронных реле на основе симисторных структур вполне достаточна для управления любыми приводами переменного тока в системах железнодорожной автоматики. Если рассматривать системы централизации стрелок и сигналов, низкое быстродействие схем не является критичным в случае управления стрелочными переводами на станциях, однако обязательно должно приниматься во внимание в процессе разработки аппаратуры управления стрелками на сортировочных горках. Следует также учесть, что на отечественных сортировочных горках применяются исключительно двигатели постоянного тока. В результате можно сформулировать следующие выводы, касающиеся области применения различных полупроводниковых приборов в составе схем РПК.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором являются наиболее подходящим вариантом для устройств управления электроприводами горочных стрелок. Техническое реше-

ние, основанное на использовании IGBT [9], успешно прошло апробацию в ходе разработки и натурных испытаний аппаратуры безопасного сопряжения для горочной микропроцессорной централизации ГМЦ ГТСС.

Симисторные оптоэлектронные реле целесообразно использовать в цепях управления станционными стрелочными приводами на основе трехфазных асинхронных двигателей и вентильных двигателей типа ЭМСУ, а также электроприводами переменного тока, применяемыми на железнодорожных переездах для управления шлагбаумами и иными заградительными устройствами. В качестве возможной области применения следует также отметить ряд других устройств, работающих на переменном токе, например приводы электромеханических автостопов на метрополитенах и приводы, используемые в системах электроснабжения железных дорог для управления разъединителями. В перечисленных областях применения отно-

сительно высокая стоимость оптоэлектронных реле в полной мере компенсируется простотой схемотехнических решений.

Полевые транзисторы с изолированным затвором и оптоэлектронные реле на основе полевых транзисторов в силу малой энергоэффективности на значительных напряжениях и относительно невысокой коммутационной способности вряд ли целесообразно использовать в системах железнодорожной автоматики для управления электроприводами. Возможной областью применения данных полупроводниковых приборов в составе схем РПК следует считать устройства управления нагрузками незначительной мощности, предусматривающие относительно частое включение управляемых объектов. В качестве одного из характерных примеров можно рассматривать релейные устройства управления светофорами, обеспечивающие мигающий режим работы сигнальных показаний без использования шин импульсного питания.

Литература

1. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под редакцией Вл. В. Сапожникова. Москва : Транспорт, 1995. 272 с.
2. Ковкин А. Н. Безопасное управление удаленными светофорами в условиях использования несинусоидальных напряжений // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 38–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-38-44. ISSN 1815–9400.
3. Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Манаков А. Д. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4. № 2. С. 264–278. ISSN 2412–9186.
4. Сагайтис В. С., Соколов В. Н. Устройства механизированных и автоматизированных сортировочных горок : справочник. Москва : Транспорт, 1988. 208 с.
5. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Москва : Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. 384 с.
6. Флоренцев С. Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий (анализ рынка) // Электротехника. 1999. № 4. С. 2–10. ISSN 0013–5860.
7. Symmetron. Электронные компоненты. Каталог. Май 2003. 236 с.
8. Inter Electric. URL: <http://www.finder-relay.ru/katalog> (дата обращения: 12.02.2020).
9. Никитин А. Б., Ковкин А. Н. Использование принципа релейно-полупроводниковой коммутации для управления стрелочными электроприводами в современных системах горочной централизации // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 2. С. 178–191. ISSN 2412–9186.

References

1. Methods of safety microelectronic railway automation systems design [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] / V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, Kh. A. Khristov, D. V. Gavzov ; ed. by V. V. Sapozhnikov. Moscow : Transport, 1995. 272 p.
2. Kovkin A. N. Safety control of remote traffic lights in conditions of use non-sinusoidal voltages [Bezopasnoe upravlenie udalennymi svetoforami v usloviyakh ispol'zovaniya nesinusoidal'nykh napryazheniy] // Transport of the Urals. 2019. No. 2 (61). Pp. 38–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-38-44. ISSN 1815–9400.
3. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Manakov A. D. Using the small-sized power relays for design of safe interface devices within the computer systems of railway automation [Ispol'zovanie malogabaritnykh silovykh rele v bezopasnykh ustroystvakh sopryazheniya komp'yuternykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] // Automation on Transport. 2018. Vol. 4. No. 2. Pp. 264–278. ISSN 2412–9186.
4. Sagaytis V. S., Sokolov V. N. Devices of mechanized and automated hump yards [Ustroystva mekhanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh gorok] : handbook. Moscow : Transport, 1988. 208 p.
5. Voronin P. A. Power semiconductor switches: families, characteristics, application [Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semeystva, kharakteristiki, primeneniye]. Moscow : Dodeka-XXI Publishing House, 2001. 384 p.
6. Florentsev S. N. State and prospects of development of power electronics devices at the turn of the century (market analysis) [Sostoyaniye i perspektivy razvitiya priborov silovoy elektroniki na rubezhe stoletiy (analiz rynka)] // Russian Electrical Engineering. 1999. No. 4. Pp. 2–10. ISSN 0013–5860.
7. Symmetron. Electronic components [Symmetron. Elektronnye komponenty]. Catalogue. May 2003. 236 p.
8. Inter Electric. URL: <http://www.finder-relay.ru/katalog> (access date: 12.02.2020).
9. Nikitin A. B., Kovkin A. N. Using the principle of relay-semiconductor communication for controlling points in modern hump interlocking systems [Ispol'zovanie printsipa releyno-poluprovodnikovoy kommutatsii dlya upravleniya strelochnymi elektroprivodami v sovremennykh sistemakh gorochnoy tsentralizatsii] // Automation on Transport. 2017. Vol. 3. No. 2. Pp. 178–191. ISSN 2412–9186.

Объем статьи 0,66 авторских листа

УДК 629.4.027.2:620.171.2(045)

Григорий Михайлович Волохов, доктор технических наук, заведующий отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия,

Гаджимет Исамединович Гаджиметов, руководитель испытательного центра АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия

ОБ ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Grigoriy Mikhaylovich Volokhov, DSc in Engineering, Head of Department of Dynamics and Rolling Stock and Infrastructure Strength, JSC Scientific Research and Design Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna, Russia, Gadzhimet Isamedinovich Gadzhimetov, Head of Testing Centre, JSC Scientific Research and Design Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna, Russia

On assessment of fatigue strength of freight car structures for high-speed trains

Аннотация

В статье изложены результаты анализа положений актуальных методик по оценке сопротивления усталости несущих конструкций вагонов, локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Рассмотрены методики, установленные нормативными документами, поддерживающими технические регламенты Таможенного союза, и европейскими стандартами. Анализ выполнен для методик как ходовых испытаний подвижного состава, так и стендовых испытаний его несущих конструкций. В ходе анализа выявлены сильные и слабые стороны существующих методик оценки сопротивления усталости. Предложены методические подходы к оценке сопротивления усталости несущих металлоконструкций грузовых вагонов скоростных поездов.

Ключевые слова: вагон, локомотив, моторвагонный подвижной состав, сопротивление усталости, несущие металлоконструкции.

Summary

The paper presents results of analysis of statements of relevant methods on assessment of fatigue strength of load-bearing structures of cars, locomotives and motive-coach rolling stock. It also discusses methods that are established by regulatory documents supporting technical regulations of the Customs Union and European standards. The authors have carried out an analysis of methods of both rolling stock tests on the line and rig tests of load-bearing structures. During the analysis they revealed strong and weak points of the existing methods for assessing fatigue strength. As a result, methodical approaches to assess fatigue strength of load-bearing structures of freight cars for high-speed trains were proposed.

Keywords: car, locomotive, motor-coach rolling stock, fatigue strength, load-bearing structures.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-36-40

ВВЕДЕНИЕ

Несущие конструкции экипажной части подвижного состава в процессе эксплуатации подвергаются длительному и интенсивному воздействию переменных циклических нагрузок. Работа конструкций в таких условиях приводит к накоплению повреждений в металле, что может вызвать появление усталостных трещин. Усталостные повреждения ведут к потере работоспособности несущих конструкций, влияя на безопасность движения. В связи с этим оценка сопротивления усталости несущих конструкций подвижного состава представляет собой важный фактор, определяющий долговечность конструкций и безопасность эксплуатации.

Оценка прочности несущих металлоконструкций при их разработке по апробированным техническим решениям регламентируется требованиями и методиками соответствующих стандартов железнодорожной отрасли [1–9]. Их основные подходы подтверждены практикой.

В настоящее время актуальной задачей становится сокращение времени доставки транзитных грузов с востока на запад России, для чего разрабатываются грузовые вагоны для поездов с конструкционной скоростью не менее 140 км/ч, и обеспечение суточного пробега до 1 тыс. км. Рама тележки таких грузовых вагонов должна представлять собой сварную пространственную конструкцию, однако в России на сегодняшний день нет эксплуатируемых аналогов в грузовом движении и соответственно нормированных подходов к оценке сопротивления усталости.

Данное обстоятельство требует проведения анализа существующих методов оценки сопротивления усталости несущих конструкций подвижного состава с целью определения их достаточности, совершенствования или разработки новых для безопасной эксплуатации грузовых вагонов скоростных поездов, в том числе исходя из экономической целесообразности (количества испытываемых образцов).

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Рассмотрим основные методические подходы к оценке сопротивления усталости деталей подвижного состава, изложенные в указанных выше нормативных документах.

В железнодорожной отрасли для оценки сопротивления усталости проводится комплекс испытаний, включающий в себя ходовые испытания подвижного состава и стендовые испытания несущих конструкций ходовой части. При этом в зависимости от типа подвижного состава применяются разные подходы.

Первый подход, основанный на линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений, нашел применение в вагоностроении и используется при оценке усталостной долговечности несущих конструкций грузовых и пассажирских вагонов [3, 4, 7]. Он предусматривает определение запаса сопротивления усталости по результатам ходовых динамических и ходовых прочностных испытаний.

Методика расчета при ходовых испытаниях включает следующие основные этапы:

выявление наиболее нагруженных элементов и зон конструкций (деталей);

регистрацию динамических воздействий, параметров (сил, перемещений, деформаций, ускорений) и напряжений в конструкции при движении по различным элементам пути со скоростями вплоть до конструкционной;

обработку динамических напряжений методами «дождя» или полных циклов по ГОСТ 25.101–83 [10];

определение эквивалентной амплитуды цикла, оказывающей тождественно повреждающее воздействие за весь срок службы в рамках гипотезы линейного суммирования повреждений;

сравнение локального предела выносливости каждой из выявленных нагруженных зон с эквивалентной амплитудой и расчет коэффициента запаса сопротивления усталости по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде напряжений при базовом числе нагружения 10^7 циклов, МПа;

$\sigma_{a,\varepsilon}$ — приведенная амплитуда динамического напряжения, эквивалентная по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный срок службы конструкции, МПа.

Определение приведенной амплитуды динамического напряжения проводится в вероятностном аспекте с учетом доли времени эксплуатации в данном диапазоне скоростей.

Сопротивление усталости боковых рам и балок наддрессорных трехэлементных тележек оценивается по результатам стендовых испытаний на усталость через коэффициент запаса в соответствии с ГОСТом 33788–2016 [7].

Методика испытаний включает следующие основные этапы: определение предела выносливости при нагружении в вертикальной плоскости девяти образцов циклически изменяющейся в асимметричном режиме силой на нескольких уровнях постоянной амплитуды;

определение приведенной амплитуды вертикальной силы, оказывающей тождественно повреждающее воздействие за весь срок службы, на основании расчетных формул;

сравнение предела выносливости детали с приведенной амплитудой вертикальной силы по формуле

$$n = \frac{\bar{P}_M}{P_{a,\varepsilon}}, \quad (2)$$

где \bar{P}_M — предел выносливости детали, определенный по результатам стендовых испытаний на сопротивление усталости;

$P_{a,\varepsilon}$ — приведенная амплитуда вертикальной силы H , действующей на деталь.

Коэффициент запаса сопротивления усталости должен соответствовать значению не менее 1,8 (согласно ГОСТу 32400–2013 [11]).

Методические подходы по проведению стендовых испытаний несущих элементов тележки пассажирского вагона не приведены в нормативных документах и не отражены в периодической литературе.

Второй подход применяется для оценки сопротивления усталости несущих конструкций локомотивов и моторвагонного подвижного состава (МВПС) [1, 2, 8, 9]. Оценка проводится по коэффициенту запаса сопротивления усталости.

Методика расчета показателя предусматривает проведение комплекса стендовых усталостных и ходовых динамико-прочностных испытаний соответствующих единиц подвижного состава (локомотивов, МВПС).

В процессе ходовых испытаний:

выявляют наиболее нагруженные элементы и зоны конструкций (деталей);

регистрируют динамические воздействия, параметры (силы, перемещения, деформации, ускорения) и напряжения в конструкции при движении по различным элементам пути со скоростями вплоть до конструкционной;

обрабатывают динамические напряжения методами «дождя» или полных циклов по ГОСТу 25.101–83 [10];

определяют максимальные значения амплитуд напряжений; вычисляют коэффициент запаса сопротивления усталости.

В зависимости от информации о фактическом значении предела выносливости при симметричном или асимметричном цикле применяются различные формулы, приведенные в [1, 2]. При наличии представительной гистограммы динамических напряжений расчет на усталость можно выполнять вероятностными методами.

Обязателен расчет коэффициента запаса сопротивления усталости по формуле

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \frac{\sigma_m}{\alpha_\sigma}}, \quad (3)$$

где σ_{-1} — значения пределов выносливости стандартного образца при изгибе или при растяжении-сжатии σ_{-1p} с симметричным циклом нагружения соответственно;

K_σ — коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца (коэффициент концентрации);

σ_α — амплитуда напряжений цикла (максимальных в зоне концентрации), вычисляется как среднее арифметическое из трех максимальных амплитуд, полученных при движении по любому из элементов пути во всем диапазоне скоростей (в том числе конструкционной) в ходе динамико-прочностных испытаний без учета напряжений, измеренных при движении по стрелочным переводам на боковой путь, МПа;

ψ_σ — коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла;

σ_m — среднее напряжение цикла, напряжения от постоянно действующих статических нагрузок, определяемых испытаниями, МПа;

α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Значения коэффициентов приведены в [1, 2].

Для оценки сопротивления усталости рам тележек и промежуточных рам (балок, брусьев и т.п.) второй ступени рессорного подвешивания локомотивов и МВПС проводят стендовые усталостные испытания на базе 10^7 циклов нагружения.

Испытаниям подвергается один образец. К объекту испытаний прикладывают статические и динамические (циклические) нагрузки. Статические нагрузки принимают равными силам тяжести устанавливаемого на объект испытаний оборудования, включая полностью оборудованный и экипированный кузов (главную раму).

Динамические составляющие вертикальных сил от веса наддресорного строения и горизонтальных рамных сил принимают по результатам динамико-прочностных испытаний конкретного типа подвижного состава, конструкции которого подлежат стендовым усталостным испытаниям. Допускается применение математического моделирования для определения значений динамических составляющих.

Подходы, используемые для оценки сопротивления усталости тележек железнодорожного подвижного состава по

требованиям европейского стандарта DIN EN 13749 [12], сводятся к следующему.

Сопротивление усталости определяют двумя способами:

на основе подхода неограниченной выносливости (предела выносливости); методом суммирования усталостных повреждений.

Первый метод заключается в том, что коэффициенты запаса прочности не рассчитывают, если при усталостных испытаниях динамические нагрузки прикладываются с включением допуска на погрешность их значений и используются минимальные значения рабочих характеристик материала. Этим методом пользуются, когда напряжения, возникающие от соответствующих комбинаций циклических нагрузок, сохраняются ниже предела выносливости, т.е. того уровня напряжений, ниже которого не возникает усталостного повреждения.

Второй метод используется, когда уровень напряжений в конструкции выше предела выносливости. Усталостную долговечность оценивают в соответствии с гипотезой суммирования усталостных повреждений Пальмгрена — Майнера с помощью диаграммы зависимости напряжений от числа циклов (кривой Велера) для материала.

Стендовые усталостные испытания по [12] в основном аналогичны принятым по [1, 2, 8, 9], но имеют следующие отличия:

дополнительно добавляются квазистатические нагрузки для имитации прохождения кривых, перевалки кузова и скручивания рамы от перекоса пути;

при сохранении общего количества 10^7 циклов они разбиваются на три этапа, из которых два последних проводятся на базе по $2 \cdot 10^6$ с квазистатическими и динамическими составляющими, увеличенными в 1,2 и 1,4 раза соответственно.

Применение в грузовом вагоностроении вероятностных методов оценки усталостной долговечности с относительно малыми запасами оправданно необходимостью снижения металлоемкости вагонов и работой их металлоконструкций в области ограниченной выносливости.

Подходы, применяемые для оценки сопротивления усталости конструкций локомотивов и МВПС, не предполагают при штатной эксплуатации возникновения напряжений выше предела выносливости.

Значения коэффициента запаса сопротивления усталости n_σ установлены в нормативных документах [1–6, 11], приведены в табл. 1.

В табл. 2 дано краткое сравнение двух подходов с их сильными и слабыми сторонами с точки зрения получения достоверного значения коэффициента запаса сопротивления усталости.

ВЫВОДЫ

Опыт эксплуатации вагонов, локомотивов, МВПС подтверждает принятые методики ходовых и стендовых испытаний для оценки сопротивления усталости несущих частей, которые следует рассматривать в комплексе. Надо отметить, что подвижной состав, прошедший оценку по методикам [1, 2, 8, 9], эксплуатируется со скоростями до 250 км/ч при суточном пробеге более 1 тыс. км.

Таким образом, сравнивая два рассмотренных подхода, а также принимая во внимание [13], в условиях недостатка экспериментальной информации о нагрузках и характеристиках прочности предлагаем для оценки сопротивления усталости несущих конструкций грузовых вагонов, планируемых к эксплуатации на поездах со скоростями до 140 км/ч, пользоваться методами, принятыми для оценки конструкций локомотивов и МВПС.

Таблица 1

Значения коэффициента запаса сопротивления усталости n

ГОСТ 33211	ГОСТ 34093	ГОСТ Р 55513	ГОСТ 33796	ГОСТ 9246	ГОСТ Р 55821	ГОСТ 32400
Не менее 1,15–1,8*	Не менее 1,2–2,2*	Не менее 2	Не менее 2	Не менее 1,3	Не менее 1,35–2,1*	Не менее 1,8

*Выбор значения осуществляется в зависимости от типа детали и (или) надежности данных $\sigma_{\alpha, N}$ и $\sigma_{\alpha, \infty}$ в формуле (1).

Таблица 2

Сравнение методик

Параметры, необходимые при определении n_{σ}	Для вагонов [6, 7]	Для локомотивов и МВПС [8, 9]
<i>Ходовые испытания</i>		
Предел выносливости конструкции	Принимается по справочным данным для характеристик материала с учетом табличных величин коэффициентов концентрации напряжений	Принимается по справочным данным для характеристик материала
Показатель угла наклона кривой усталости	Принимается по рекомендациям нормативных документов	Не требуется
Распределение скоростей движения для определения эквивалентного значения эксплуатационных напряжений	Принимается установленное нормативными документами	Рассматриваются напряжения во всем диапазоне эксплуатационных скоростей, включая конструкционную
Эксплуатационная нагруженность	По результатам динамико-прочностных испытаний (ходовых и на соударение)	
Погрешность обработки случайного процесса эксплуатационной нагруженности	Связана с применением методов схематизации для построения гистограмм нагружения по амплитуде и числу циклов	Получение величины эксплуатационного нагружения обеспечивается с вероятностью 0,997
<i>Стендовые испытания</i>		
Тележка грузового вагона		Тележка пассажирского вагона
Количество испытываемых образцов	Девять рам боковых и наддрессорных балок тележки грузового вагона	Одна рама тележки и промежуточная балка (при наличии)
Схема нагружения	В вертикальной плоскости	В вертикальной и горизонтальной плоскостях
Эксплуатационная нагруженность	Расчет по аналитическим формулам	По результатам испытаний и (или) моделирования
Предел выносливости	Определяется с установленной вероятностью	Принимается по справочным данным для характеристик материала

Для повышения надежности получаемых характеристик сопротивления усталости предлагаем проводить испытания на трех образцах, используя минимальные значения рабочих характеристик несущих элементов тележки, для чего воспроизводимую в испытаниях нагрузку следует корректировать путем увеличения статической умножением на коэффициент вертикальной динамики, определяемый по формуле

$$K_{d,N}^B = K_{d,max}^B / (1 - Z_p \nu_{K_{d,max}^B}),$$

где $K_{d,max}^B$ — максимальное значение коэффициента вертикальной динамики, зарегистрированное при динамических испытаниях, вычисляется аналогично σ_{α} в формуле (3);

Z_p — квантиль распределения, соответствующий вероятности P , с учетом того что $K_{d,N}^B$ — случайная величина, имеющая нормальный закон распределения, для $P = 0,997$ Z_p принимается равным 2,748;

$\nu_{K_{d,max}^B}$ — коэффициент вариации, принимается равным 0,07.

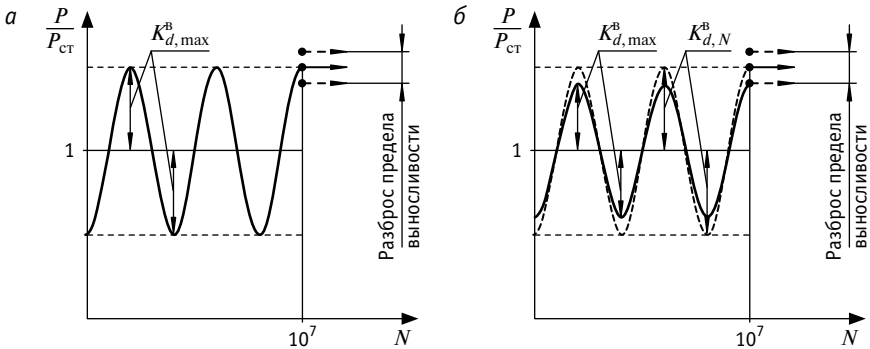


Рис. 1. Режим стендовых усталостных испытаний:
а — по [1, 2, 8, 9]; б — усовершенствованный

Возникновение трещин усталостного характера не допускается на базе испытаний. Поэтому испытания полезно продолжить до возникновения трещин уже после наработки базы с контролируемым форсированием для скорейшего их завершения и получения отправной точки последующего теоретического анализа ресурса.

Суть предложения по проведению стендовых усталостных испытаний представлена на рис. 1.

По мере накопления информации о характеристиках несущих конструкций грузовых вагонов скоростных поездов, о распределении скоростей в эксплуатации и по мере развития методик стендовых испытаний для оценки прочности можно использовать подход, принятый в вагоностроении, в соответствии с которым усталостная долговечность определяется в вероятностном аспекте, что позволит снизить массу тары и металлоемкость вагона.

Литература

1. ГОСТ Р 55513–2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2014. 46 с.
2. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 41 с.
3. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 59 с.
4. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2017. 46 с.
5. ГОСТ 9246–2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 37 с.
6. ГОСТ Р 55821–2013. Тележки пассажирских вагонов локомотивной тяги. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2016. 20 с.
7. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва : Стандартинформ, 2016. 50 с.
8. ГОСТ Р 55514–2013. Локомотивы. Методика динамико-прочностных испытаний. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
9. ГОСТ 34451–2018. Моторвагонный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний. Москва : Стандартинформ, 2019. 28 с.
10. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. Москва : Издательство стандартов, 1983. 21 с.
11. ГОСТ 32400–2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 62 с.
12. DIN EN 13749:2011. Railway applications. Wheelsets and bogies. Method of specifying the structural requirements of bogie frames. CEN, 2011. 57 p.
13. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Москва : Машиностроение, 1977. 166 с.

References

1. GOST R 55513–2013. Locomotives. Requirements to strength and dynamic properties [Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2014. 46 p.
2. GOST 33796–2016. Railway multiple units. Durability and dynamic requirements [Motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 41 p.
3. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 59 p.
4. GOST 34093–2017. Passenger cars on locomotive traction. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony passazhirskie lokomotivnoy tyagi. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2017. 46 p.
5. GOST 9246–2013. Bogies two-axle three-piece for freight wagons of 1520 mm gauge railways. General technical specifications [Telezhki dvukhosnye trekhlelementnye gruzovyykh vagonov zheleznikh dorog kolei 1520 mm. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 37 p.
6. GOST R 55821–2013. Bogies of passenger cars on locomotive traction. Specifications [Telezhki passazhirskikh vagonov lokomotivnoy tyagi. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2016. 20 p.
7. GOST 33788–2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance [Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva]. Moscow : Standardinform, 2016. 50 p.
8. GOST R 55514–2013. Locomotives. Dynamic and strength testing procedures [Lokomotivy. Metodika dinamiko-prochnostnykh ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 16 p.
9. GOST 34451–2018. Motor railway rolling stock. Methodology of dynamic-strength tests [Motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Metodika dinamiko-prochnostnykh ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2019. 28 p.
10. GOST 25.101–83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results [Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktivnykh i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov]. Moscow : Publishing House of Standards, 1983. 21 p.
11. GOST 32400–2013. Molded side frame and bolster beam of bogies for railway freight wagons. Specifications [Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhki zheleznodorozhnykh gruzovyykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 62 p.
12. DIN EN 13749:2011. Railway applications. Wheelsets and bogies. Method of specifying the structural requirements of bogie frames. CEN, 2011. 57 p.
13. Kogaev V. P. Strength calculations at time-varying stresses [Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni]. Moscow : Machinery, 1977. 166 p.

Объем статьи 0,57 авторских листа

УДК 629.463.32

Никита Александрович Битюцкий, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), генеральный директор ООО «Экспертный центр подвижного состава», Санкт-Петербург, Россия,

Владимир Викторович Галов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), руководитель отдела комплексных испытаний ООО «Инженерный центр подвижного состава», Санкт-Петербург, Россия,

Людмила Валериевна Цыганская, кандидат технических наук, заместитель генерального директора — начальник НИБ АО «НВЦ «Вагоны», Санкт-Петербург, Россия,

Александр Игоревич Бондаренко, начальник отдела грузовых вагонов НИБ АО «НВЦ «Вагоны», Санкт-Петербург, Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОСЬМИОСНОГО ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ АЛКИЛБЕНЗОЛСУЛЬФОКИСЛОТЫ С ПРОДЛЕНИЕМ СРОКА СЛУЖБЫ

Nikita Alexandrovich Bityutskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Technology of Metals Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), General Director of LLC Rolling Stock Expert Centre, St. Petersburg, Russia,

Vladimir Viktorovich Galov, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), Head of Comprehensive Testing Department, LLC Rolling Stock Engineering Centre, St. Petersburg, Russia,

Lyudmila Valerievna Tsyganskaya, PhD in Engineering, Deputy General Director — Head of SRB, JC «SIC «Cars», St. Petersburg, Russia,

Alexander Igorevich Bondarenko, Head of Freight Car Department, SRB, JC «SIC «Cars», St. Petersburg, Russia

Modernization of eight-axle tank car for alkylbenzenesulfonic acid with extension of service life

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос продления срока службы восьмиосных вагонов-цистерн, предназначенных для перевозки алкилбензолсульфокислоты, за счет модернизации конструкции. В ходе работ по модернизации выполнены техническое диагностирование вагонов исходной конструкции, ремонт либо замена комплектующих изделий и оборудования вагона, комплекс расчетов и испытаний модернизированной конструкции. При техническом диагностировании проведен статистический анализ повреждений, определена скорость коррозии элементов конструкции в эксплуатации, спрогнозирован остаточный срок службы вагонов. На основании результатов технического диагностирования построена конечно-элементная модель вагона, разработаны нормативные расчеты, на натурных образцах вагонов выполнен необходимый комплекс испытаний. По результатам расчетов и испытаний подтверждена достоверность полученных данных, обоснован срок службы вагонов модернизированной конструкции.

Ключевые слова: восьмиосный вагон-цистерна, алкилбензолсульфокислота, модернизация, техническое диагностирование, нормативные расчеты, испытания.

Summary

The paper considers an issue of extending the service life of eight-axle tank cars for alkylbenzenesulfonic acid by modernization of car design. The modernization included technical diagnostics of cars with basic design, repair or replacement of car parts and equipment, calculations and tests of modernized car design. During the technical diagnostics of cars the authors carried out a statistical analysis of failures, determined a speed of corrosion of car elements in operation and predicted a residual service life. On the basis of results of technical diagnostics the authors created a finite element model of the car, formulated normative calculations and carried out necessary tests on natural samples of cars. As a result, calculations and tests confirmed the reliability of gained data, justified the service life of the modernized car design.

Keywords: eight-axle tank car, alkylbenzenesulfonic acid, modernization, technical diagnostics, normative calculations, tests.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-41-46

За последнее время в связи с развитием химической промышленности России наблюдается тенденция к наращиванию объема перевозок алкилбензолсульфокислоты железнодорожным транспортом. Этот продукт неорганической химии широко применяется в качестве основы синтетических моющих средств, поверхностно-активных веществ для флотации руд в горнодобывающей промышленности, пенообразователя при производстве теплоизолирующих материалов (пеноизола).

Одним из основных типов подвижного состава для перевозки алкилбензолсульфокислоты были переоборудованные узкоспециализированные восьмиосные вагоны-цистерны модели 15-1578-01. Переоборудование производилось по техническим условиям ТУ 3182-029-260338543-01 УК, чтобы обеспечить верхний слив-налив, начиная с 2001 г. В качестве исходных использовались вагоны-цистерны модели 15-1578 для суперфосфорной кислоты в объеме партии 60 шт., выпускаемые ПО «Азовмаш» по техническим условиям ТУ 24.00.6229-91 с 1991 г. Вагоны-цистерны модели 15-1578 — это результат сотрудничества с европейскими партнерами, так как они были укомплектованы котлами производства завода «Арбель-Фове-Рай» (Франция) [1].

В настоящее время парк вагонов-цистерн предельно изношен и требует обновления. Вагоны эксплуатируются с истекающим сроком службы, и актуальной является задача его продления путем проведения работ по модернизации исходной конструкции вагонов модели 15-1578-01 и постановке на производство модернизированной конструкции.

Для решения вопроса о продлении срока службы вагонов-цистерн проектно-конструкторским бюро АО «ВНИИЖТ» (СКБ АО «МИИТ») разработан проект модернизации. Объем работ по модернизации включал в себя следующие этапы: оценку технического состояния вагона исходной конструкции (модель 15-1578-01), ремонт или замену комплектующих изделий и оборудования вагона, выполнение комплекса расчетов и испытаний модернизированной конструкции с присвоением индекса новой модели 15-6944.



Рис. 1. Общий вид вагона-цистерны в сборе

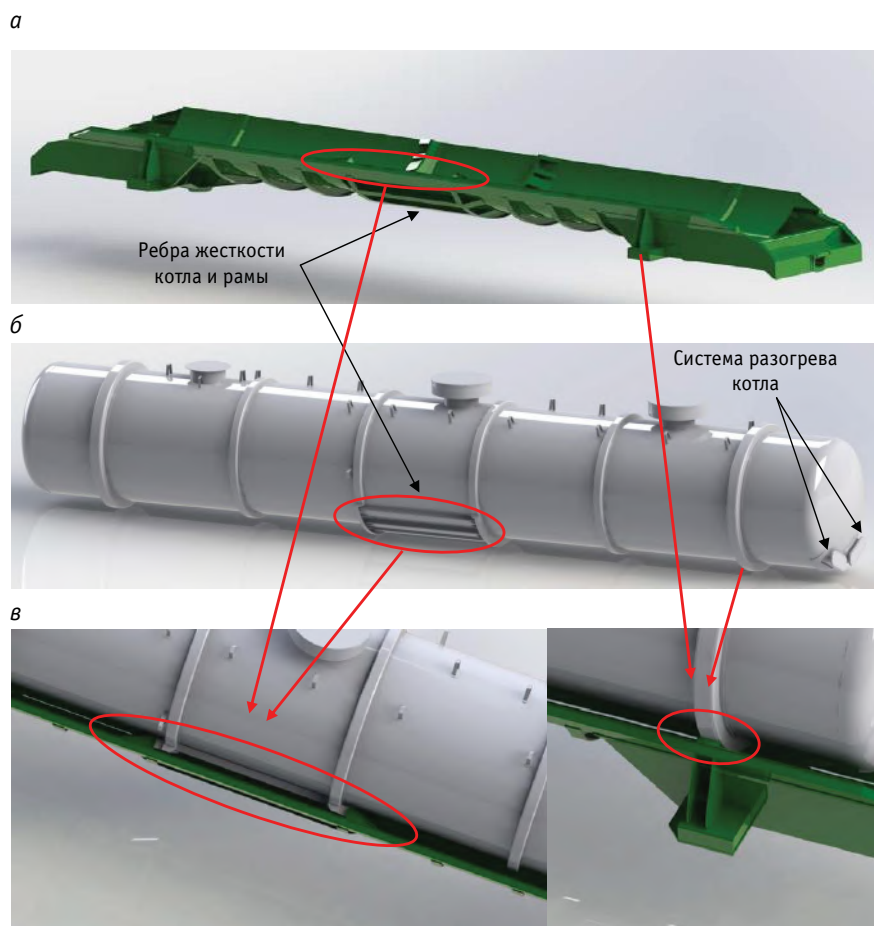


Рис. 2. Конструкция вагона-цистерны:

а — рама; б — котел; в — крепление котла к раме

Работы по модернизации и постановке на производство вагонов модернизированной конструкции выполнены на площадке АО «ТСЗ «Титран-Экспресс» — сервисного центра 1-й категории по проведению плановых видов ремонта грузового подвижного состава и эксплуата-

ционному сопровождению грузовых вагонов нового поколения.

К особенностям конструкции модернизируемого вагона следует отнести уникальную конструкцию рамы, не имеющую аналогов среди серийно выпускаемых вагонов-цистерн. Рама вагона, выполненная

из стали Е36.4, состоит из двух полурам, объединенных ложементом полукруглой формы. Связь между шкворневыми узлами осуществляется через боковые балки, образующие замкнутый контур со шкворневыми балками, и элементы цилиндрического днища ложемента, размещенного в этом контуре. Для увеличения жесткости в днище имеются ребра жесткости, расположенные по окружности цилиндрической части и параллельно продольной оси вагона в средней части (рис. 1, 2а).

Котел вагона изготовлен из нержавеющей стали марки URANUS В 6 М (близкий аналог стали 06ХН28МДТ согласно [2]), имеет цилиндрическую обечайку и два торосферических днища, оборудован теплоизоляцией и системой разогрева из обогревательных труб. В средней части котла размещены ребра жесткости, аналогичные по расположению и конструкции ребрам жесткости рамы (рис. 1, 2б). Крепление котла к раме производится опорными кольцевыми шпангоутами котла, опирающимися на бруски из фторопласта, закрепленные на ложементе рамы в зоне шкворневой балки, и опорными кольцевыми шпангоутами котла и поясов, расположенными на ложементе рамы в центральной части,

между которыми установлены распорные конусовидные бруски из фторопласта (рис. 1, 2а–2в).

Такое конструктивное решение позволяет более равномерно распределить продольные нагрузки и повысить теплоизоляционные свойства вагона-цистерны за счет исключения мостиков холода между рамой и котлом.

Теплоизоляция вагона-цистерны выполнена из жесткого вспененного пенополиуретана толщиной 200 мм, которым также заполнено пространство между котлом и ложементом рамы. Снаружи для защиты теплоизоляции установлен кожух, выполненный из нержавеющей стали.

В качестве ходовых частей на вагоне использованы две четырехосные тележки модели 18-6875, аналогичные по конструкции тележкам модели 18-101, успешно прошедшие процедуру постановки на производство на АО «ТСЗ «Титран-Экспресс».

Для анализа технического состояния и оценки возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вагонов-цистерн выполнен ставший традиционным комплекс работ, включающий обследование технического состояния вагонов и оценку скорости коррозионного износа.

На первоначальном этапе были обобщены результаты диагностирования технического состояния вагонов-цистерн, проведенного экспертным центром ООО «ЭЦПС» с 2010 по 2012 г. На протяжении этого периода в объеме работ по продлению срока службы было обследовано более 60 вагонов-цистерн модели 15-1578-01 с истекшим сроком службы. На основе выполненных исследований технического состояния вагонов-цистерн сделан статистический анализ (рис. 3) и установлено, что основным элементом, наиболее подверженным эксплуатационным повреждениям, — это котел вагона-цистерны (рис. 4а–4е), в то время как повреждения рамы практически отсутствуют.



Рис. 3. Повреждения вагонов-цистерн в эксплуатации

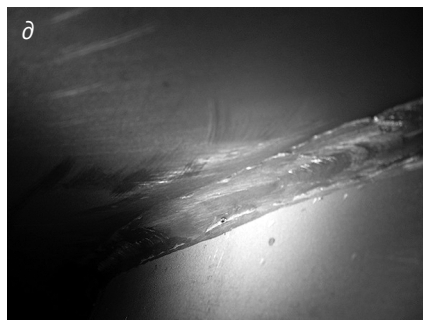
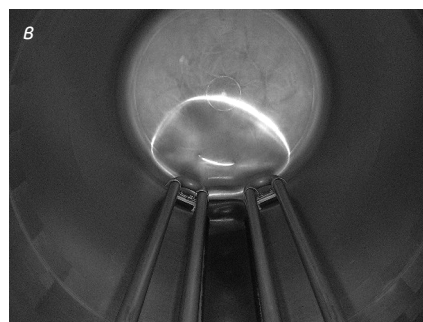


Рис. 4. Основные эксплуатационные повреждения котла вагона-цистерны:

а — нестандартный катет шва; б — ослабление крепления труб разогрева; в — вмятина днища; з — непровар шва; д — пора; е — нестандартное крепление труб разогрева

Выявленные эксплуатационные повреждения и неисправности не являются критическими с точки зрения невозможности или сложности их устранения для восстановления прочности и целостности металлоконструкции вагона-цистерны в целом и могут быть устранены в рамках проведения плановых видов ремонта.

Скорость коррозионного износа основных элементов котла и рамы вагонов-цистерн модели 15-1578-01 оценивалась с использованием метода ультразвуковой толщинометрии после 20 лет эксплуатации вагонов. Измерения выполнялись с учетом результатов работ первого этапа в наиболее нагруженных зонах, определенных на основании расчетов прочности.

По результатам оценки было установлено, что элементы котлов и рам имеют равномерный коррозионный износ. Значения максимальной скорости коррозии элементов котлов и рам вагонов-цистерн модели 15-1578-01 составляют 0,015 мм/год, что более чем в 2,5 раза меньше рекомендуемой скорости коррозии 0,04 мм/год, устанавливаемой нормами [3] при проектировании грузового подвижного состава, и не превышают показателей минусового допуска на прокат.

Выполненные исследования показали, что вагоны-цистерны модели 15-1578-01 к моменту окончания назначенного срока службы не в полной мере исчерпали свой ресурс. Результаты анализа технического состояния и оценки возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вагонов-цистерн использовались на последующих этапах при определении запаса сопротивления усталости металлоконструкции вагона на 1,5-й нормативный срок службы — 30 лет.

В рамках работ по модернизации на образцах вагонов произведена замена оборудования и комплектующих изделий: установлены новые автосцепные устройства, поглощающий аппарат класса ТЗ, тормозное оборудование, предохранительный клапан, ходовые части (тележки). Дополнительно в модернизированных вагонах изменена конструкция подножек и поручней, предназначенных для работы составителя и сцепщика, с целью приведения в соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011).

На следующем этапе на основании экспериментальных данных, полученных по результатам диагностирования технического состояния вагонов и остаточным толщинам элементов с учетом скорости коррозионного износа, проектно-конструкторским бюро АО «ВНИИЖТ» (СКБ АО «МИИТ») была построена конечно-элементная модель вагона и проведен комплекс расчетов для оценки прочности конструкции [4, 5]. Результаты расчетов показали соответствие требованиям нормативных документов [3, 6]. Среди наиболее нагруженных зон конструкции вагона отмечены зона окончания усиливающей накладки опорного листа рамы (рис. 5), зоны сопряжения горловины люка-лаза и днища с обечайкой котла (рис. 6).

Для подтверждения результатов расчетных исследований испытательным цен-

тром ООО «ИЦПС» был проведен комплекс предварительных и приемочных испытаний опытных образцов вагонов модернизированной конструкции [7]. Стационарные испытания проводились на площадке АО «ТСЗ «Титран-Экспресс» (Тихвин), ходовые — на полигоне Белореченская — Майкоп (Белореченск).

Для испытаний были предъявлены два образца вагонов, прошедших модернизацию: первый образец с демонтированными защитным кожухом и тепловой изоляцией для стационарных прочностных испытаний (рис. 7а), второй образец в полной экипировке — для контроля габарита, подножек и поручней, стационарных тормозных и ходовых испытаний (рис. 7б).

Чтобы оценить силовое воздействие на путь от поставленной на производство четырехосной тележки модели 18-6875,

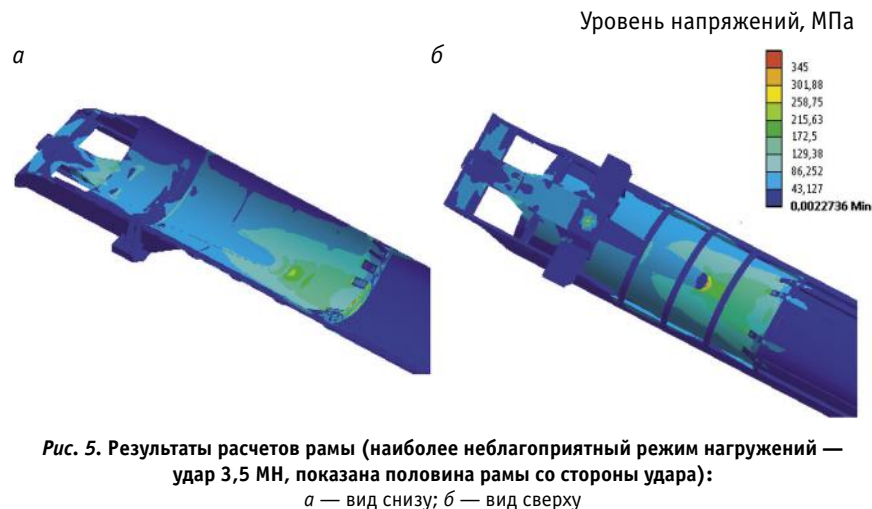


Рис. 5. Результаты расчетов рамы (наиболее неблагоприятный режим нагружений — удар 3,5 МН, показана половина рамы со стороны удара):
а — вид снизу; б — вид сверху

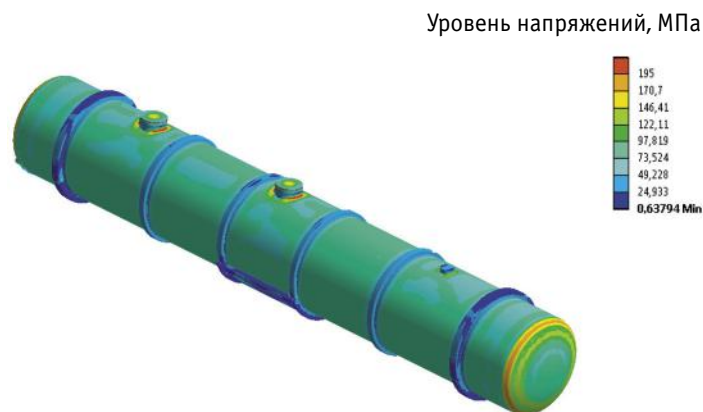


Рис. 6. Результаты расчетов котла (наиболее неблагоприятный режим нагружений — нагрузка от пробного давления 6 кгс/см²)



Рис. 7. Опытные образцы вагона:

а — без кожуха и теплоизоляции; б — в экипированном состоянии

на полигоне Белореченская — Майкоп (Белореченск) были дополнительно проведены испытания вагона по воздействию на путь и стрелочные переводы.

При испытаниях установлено, что габаритные размеры вагона, геометрические параметры подножек и поручней, показатели работы тормозной системы, ходовые качества, характеристики прочности и сопротивления усталости удовлетворяют требованиям нормативных документов [3, 6, 8], а показатели воздействия на путь и стрелочные переводы [9] имеют большой запас по сравнению с типовыми вагонами благодаря снижению осевой нагрузки с 23,5 (у типовых вагонов) до 21,75 тс.

Результатами прочностных испытаний подтверждено расположение наиболее нагруженных зон конструкции, выявленных на этапе расчетных исследований. При оценке восприятия нагрузок от неблагоприятных режимов нагружения для элементов рамы (удар 3,5 МН, см. рис. 5) выявлено значительное отличие (50 % и более) в распределении расчетных и экспериментальных значений напряжений от продольных нагрузок по направлению удара вдоль продольной оси вагона.

На основании построенных зависимостей (зоны А–Ж, рис. 8) установлено, что расчет не в полной мере характеризует работу конструкции при восприятии продольных нагрузок вагоном. Различие в восприятии этих нагрузок на модели и натурном образце обусловлено составной конструкцией вагона, в которой котел и рама жестко не закреплены между собой.

Результаты эксперимента по сравнению с расчетом показывают, наоборот, «равнонагруженную картину» с расхождением показаний в симметричных зонах, не превышающим 10 %. В наиболее нагруженных зонах расхождение между полученными экспериментальными и расчетными данными не превышает 15 % при уровне напряжений 90 % от допускаемых значений (хребтовая балка, зона Д, см. рис. 8б). Таким образом, наиболее нагруженные зоны конструкции достоверно подтверждены как экспериментально, так и расчетным путем.

В целом выполненный комплекс по модернизации вагонов-цистерн позволил АО «ТСЗ «Титран-Экспресс» пройти процедуру их постановки на производство и получить сертификат соответствия на выпуск установочной партии. Модернизированные вагоны в настоящее время успешно эксплуатируются на железных дорогах России и стран СНГ.

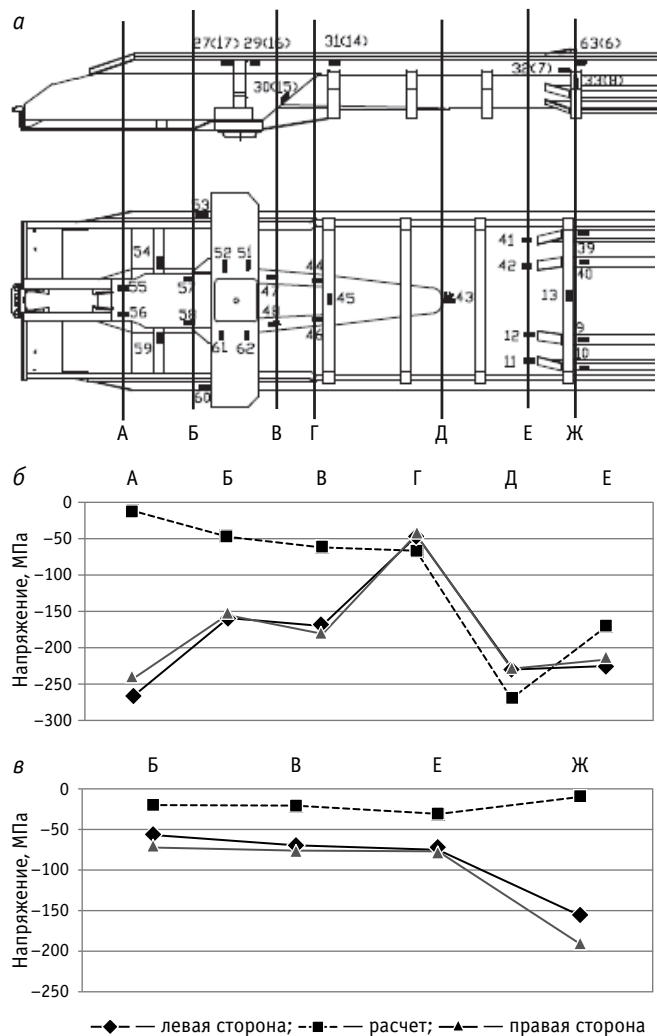


Рис. 8. Восприятие вагоном продольных нагрузок при соударении 3,5 МН:

а — расположение контрольных зон; б, в — распределение напряжений в контрольных зонах (б — хребтовая балка, в — боковые балки)

Литература

1. Вагоны : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.] ; под ред. Л. А. Шадура; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1980. 439 с.
2. ГОСТ 5632–2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Москва : Стандартинформ, 2015. 54 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва : ГосНИИВ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
4. Зенкевич О. С. Метод конечных элементов в технике. Москва : Мир, 1975. 543 с.
5. Нагруженность элементов конструкции вагона : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Н. Котуранов, В. Д. Хусидов, П. А. Устич, А. И. Быков ; под ред. В. Н. Котуранова. Москва : Транспорт, 1991. 238 с.
6. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 58 с.
7. Анисимов П. С. Испытания вагонов : монография. Москва : Маршрут, 2004. 194 с.
8. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва : Стандартинформ, 2016. 46 с.
9. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Москва : Стандартинформ, 2013. 22 с.

References

1. Cars [Vagony] : textbook for railway transport universities / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikol'skiy et al. ; ed. by L. A. Shadur ; 3rd ed., revised and enlarged. Moscow : Transport, 1980. 439 p.
2. GOST 5632–2014. Stainless steels and corrosion resisting, heat-resisting and creep resisting alloys. Grades [Legirovannyye nerzhavayushhie stali i splyavy korrozionno-stoykie, zharostoykie i zharoprochnyye. Marki]. Moscow : Standardinform, 2015. 54 p.
3. Norms for calculation and design of the new and upgraded 1520 mm railway cars of Ministry of Railways (non-self-propelled) [Normy dlya rascheta i projektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)]. Moscow : GosNIIV ; VNIIZhT, 1996. 319 p.
4. Zenkevich O. S. Finite element method in engineering [Metod konechnykh elementov v tekhnike]. Moscow : World, 1975. 543 p.
5. Stress loading of car elements [Nagruzhennost' elementov konstruktssii vagona] : textbook for railway transport universities / V. N. Koturanov, V. D. Khusidov, P. A. Ustich, A. I. Bykov ; ed. by V. N. Koturanov. Moscow : Transport, 1991. 238 p.
6. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 58 p.
7. Anisimov P. S. Car tests [Ispytaniya vagonov] : monograph. Moscow : Route, 2004. 194 p.
8. GOST 33788–2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance [Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva]. Moscow : Standardinform, 2016. 46 p.
9. GOST R 55050–2012. Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods [Zheleznodorozhnyy podvzhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2013. 22 p.

Объем статьи 0,68 авторских листа

УДК 621.436

Леонид Валерьевич Плотников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,
Никита Игоревич Григорьев, кандидат технических наук, главный конструктор ООО «Уральский дизель-моторный завод» (УДМЗ), доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,
Николай Сергеевич Кочев, аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,
Леонид Евгеньевич Осипов, магистрант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ ВО ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ

Leonid Valeryevich Plotnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,
Nikita Igorevich Grigoryev, PhD in Engineering, Chief Designer of LLC Ural Diesel Engine Plant, Associate Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,
Nikolay Sergeevich Kochev, postgraduate student, Thermal Engineering and Heat Engineering Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia
Leonid Evgenyevich Osipov, graduate student, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Improvement of operational indicators of automobile internal combustion engines by development of thermogasdynamics in intake system

Аннотация

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) — самые распространенные источники энергии среди тепловых двигателей. ДВС широко применяются в качестве силовой установки на автомобильном транспорте. В настоящее время большинство из них оснащаются системой турбонаддува. Теплохимическое совершенство процессов во впускной системе во многом влияет на эффективность поршневых двигателей.

В статье предложен способ стабилизации пульсирующих потоков во впускной системе путем установки выравнивающей решетки в выходной канал турбокомпрессора (ТК). Исследования проводились на экспериментальной установке, которая состояла из одноцилиндрового двигателя (8,2/7,1) и системы турбонаддува (ТКР-6). Термоанемометр постоянной температуры оригинальной конструкции использовался для определения мгновенных значений скорости потока воздуха и локального коэффициента теплоотдачи. Установлено, что наличие выравнивающей решетки во впускной системе приводит к снижению степени турбулентности вплоть до 25 % по сравнению с базовой впускной системой (при сохранении расходных характеристик). Показано, что установка выравнивающей решетки во впускной системе ДВС с ТК также приводит к снижению интенсивности теплоотдачи до 15 % по сравнению с базовой системой. Определены значения интенсивности отказов и вероятности безотказной работы двигателя с базовой и модернизированной впускной системой.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система турбонаддува, система впуска, пульсирующие потоки газа, термогазодинамика, выравнивающая решетка, показатели надежности.

Summary

Piston internal combustion engines (ICE) are the most widespread sources of energy among heat engines. The ICEs are widely used as power installations on road transport. Nowadays, most of the ICEs are equipped with the boost-pressure charge system. Thermal and mechanical improvement of processes in intake system largely affects the efficiency of piston engines.

The paper proposes a method of stabilization of pulsing flows in the intake system by the installation of the equalizing frame in the output channel of the turbocharger (TC). Investigations were carried out on an experimental installation that consisted of single-cylinder engine (8.2/7.1) and boost-pressure charge system (TKR-6). Determination of instantaneous values of air flow speed and local heat transfer coefficient was conducted by the use of constant-temperature heat loss anemometer with an original design. It is established that the presence of the equalizing frame in the intake system leads to the decrease of turbulence level up to 25 % in comparison with the basic intake system (with preservation of metering characteristics). It is shown that the installation of the equalizing frame in the intake system of the ICE with TC also leads to the decrease in heat transfer intensity up to 15 % in comparison with the basic system. As a result, the authors determined values of breakdown intensity and probability of failure-free operation of engine with basic and modernized intake system.

Keywords: internal combustion engine, boost-pressure charge system, intake system, pulsing gas flows, thermogasdynamics, equalizing frame, reliability indicators.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-47-51

ВВЕДЕНИЕ

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) широко применяются в качестве силовой установки на автомобильном транспорте. В России суммарная мощность поршневых двигателей только грузовых автомобилей и специальной техники в разы превышает установленную мощность всех ТЭЦ и ТЭС. Это подчеркивает актуальность исследований и модернизации процессов и конструкций ДВС для повышения их КПД и надежности. Авторами работ [1–3] было установлено, что от совершенства тепломеханических процессов во впускной системе поршневого двигателя внутреннего сгорания с турбокомпрессором (ТК) зависит эффективность и надежность ДВС в целом. Газодинамическое совершенство конструкции впускной системы ДВС с ТК определяет качество наполнения цилиндра рабочим телом и особенности протекания процессов смесеобразования и сгорания. Тепломеханическое совершенство впускной системы влияет на интенсивность охлаждения рабочего тела в процессе впуска и на температурные напряжения в деталях и узлах рассматриваемой системы, а следовательно, на показатели надежности.

Вместе с тем очевидно, что установка турбокомпрессора приводит к существенному изменению тепломеханических характеристик потока газа во впускной системе поршневого двигателя [3–6]. Это связано с тем, что лопаточный механизм колеса компрессора турбокомпрессора является источником внешней турбулентности для основного напорного течения в рассматриваемой системе. При значениях степени турбулентности Tu более 0,1 внешняя турбулентность может существенно влиять на характер развития и структуру пограничного слоя, что, в свою очередь, оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи [7].

Исследованием влияния различных конфигураций систем наддува на эксплуатационные показатели поршневых двигателей занимаются многие ученые и инженеры [8–10]. Установлено, что системы наддува на основе турбокомпрессора еще не исчерпали свой потенциал и соответственно способны улучшать показатели энергетических машин на базе поршневых ДВС. Следует отметить, что существуют комплексные работы по совершенствованию процессов во впускных и выпускных системах, входных и выходных каналах турбокомпрессора, режимах работы ДВС и ТК. В частности, совершенствуются конструкции впускных и выпускных систем для повышения КПД турбокомпрессора и двигателя [11, 12]. Майорова Ю. А. и др. [13] представили оригинальный метод моделирования процессов в дизельном двигателе с турбонаддувом, который учитывает особенности работы лопаточного аппарата и геометрию газозвуковых трактов. В свою очередь, в статье [14] рассмотрена система управления турбины ТК с изменяемой геометрией для улучшения приемистости, экологичности и экономичности двигателя. В экспериментальной работе [15] произведено газодинамическое совершенствование впускной системы с целью повышения КПД турбины и ДВС. Отметим, что в настоящее время небольшое количество исследований проводится экспериментальными методами с учетом газодинамической нестационарности, характерной для поршневых двигателей с ТК.

Таким образом, цель данного исследования состояла в разработке способа тепломеханического совершенствования процессов во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором путем стабилизации пульсирующих потоков газа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1а), который состоял из одноцилиндрового макета поршневого двигателя и турбокомпрессора с независимой системой привода ротора. Диаметр цилиндра составлял 82 мм, ход поршня — 71 мм. В исследовании использовался турбокомпрессор модели ТКР6.

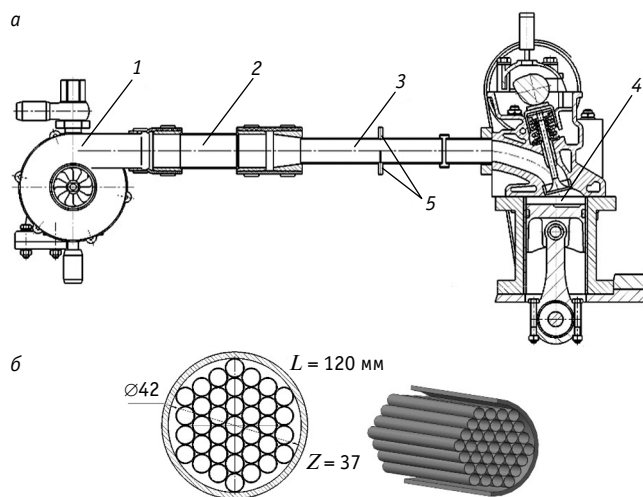


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки (а) и конфигурация выравнивающей решетки (б):

1 — турбокомпрессор; 2 — выходной канал компрессора; 3 — впускная труба; 4 — поршневой двигатель; 5 — датчики термоанемометра

Поршневой двигатель приводился во вращение с помощью электрического двигателя, частота вращения коленчатого вала которого изменялась в диапазоне от 600 до 3000 мин⁻¹. Ротор турбокомпрессора приводился во вращение путем подачи сжатого воздуха на лопатки турбины от внешнего источника. Частота вращения ротора ТК изменялась в диапазоне от 30000 до 50000 мин⁻¹. В качестве рабочего тела использовался воздух с температурой 30–45 °С (в зависимости от режима работы турбокомпрессора). Давление во впускной системе составляло от 0,111 до 0,146 МПа.

В ходе экспериментов определялись мгновенные значения скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во впускном трубопроводе (рис. 1а), для этого использовался термоанемометр постоянной температуры. В исследовании применяли два разных типа датчиков: 1) для определения скорости w_x — датчик со свободной нитью, расположенной перпендикулярно оси канала; 2) для определения локального коэффициента теплоотдачи α_x — датчик с нитью, расположенной на поверхности фторопластовой подложки, которая устанавливалась заподлицо во впускном трубопроводе. Систематическая погрешность измерения скорости по-

тока воздуха составляла 5,5 %, локального коэффициента теплоотдачи $\sim 10,0$ %. Подробнее метод определения w_x и α_x описан в статье [16]. Значения частот вращения коленчатого вала двигателя n измерялись тахометром (индуктивный датчик и диск с метками на валу), значения частот вращения ротора ТК $n_{\text{ТК}}$ — бесконтактным цифровым тахометром (лазер и отражающая метка на колесе). Данные с датчиков поступали в режиме реального времени в аналого-цифровой преобразователь (L-Card) и далее в компьютер для обработки в специализированном программном обеспечении.

Для стабилизации течения во впускной системе использовалась выравнивающая решетка на основе принципа хонейкомба (рис. 1б), она состояла из 37 сот (трубочек) диаметром 5,5 мм и длиной 120 мм, которые устанавливались в выходной канал компрессора перед впускным трубопроводом поршневого двигателя (см. рис. 1а).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлены данные о скорости потока воздуха w_x и локальном коэффициенте теплоотдачи α_x за рабочий цикл двигателя для базовой впускной системы и впускной системы с выравнивающей решеткой для одного режима работы ДВС и ТК.

Из рис. 2 видно, что установка выравнивающей решетки в выходной канал компрессора приводит к заметному сглаживанию амплитуд пульсаций скорости потока воздуха во впускной системе поршневого ДВС в течение всего рабочего цикла. При этом максимальные значения скорости остаются практически одинаковыми для обеих исследуемых впускных систем (разница не превышает 5 %, что находится в рамках погрешности опытов).

Установка выравнивающей решетки в выходной канал компрессора также приводит к существенному сглаживанию за-

висимости $\alpha_x = f(\tau)$ во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором (см. рис. 2). При этом наличие выравнивающей решетки приводит к снижению максимальных значений локального коэффициента теплоотдачи на 14 % по сравнению с базовой системой впуска.

Для количественной оценки уровня стабилизации пульсирующего потока воздуха во впускной системе поршневого двигателя рассчитывалась степень турбулентности Tu за рабочий цикл для обеих исследуемых конфигураций на разных режимах работы ДВС и ТК (рис. 3а). Также определялись средние значения локального коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_x$ за период процесса впуска (интенсивность теплоотдачи) для базовой впускной системы и впускной системы с выравнивающей решеткой (рис. 3б).

Сравнительный анализ степени турбулентности во впускных системах разной конфигурации показывает, что установка выравнивающей решетки в выходном канале компрессора приводит к снижению Tu вплоть до 25 % по сравнению с базовой системой впуска. Это свидетельствует о высокой эффективности данного способа для стабилизации (снижения амплитуд пульсаций скорости) нестационарных потоков во впускной системе поршневого ДВС с ТК. Более того, стабилизация пульсирующего потока во впускной системе может положительно сказаться на КПД компрессора ТК (рост КПД в пределах 2–3 %).

При этом с ростом частоты вращения коленчатого вала двигателя отличия в значениях Tu уменьшаются и не превышают 5 %. Также можно отметить, что с ростом частоты вращения ротора турбокомпрессора отличия в значениях Tu увеличиваются. Например, при $n_{\text{ТК}} = 42000 \text{ мин}^{-1}$ максимальные отличия степени турбулентности составляют 10,3 %, а при $n_{\text{ТК}} = 50000 \text{ мин}^{-1}$ достигают 24,6 %. По нашему мнению, это связано с избыточной производительностью турбокомпрессора на данных

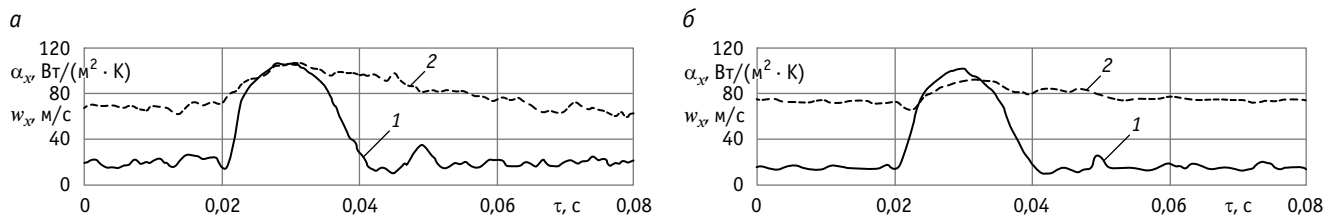


Рис. 2. Зависимости местной скорости w_x (1) и локального коэффициента теплоотдачи α_x (2) во времени для базовой впускной системы (а) и системы впуска с выравнивающей решеткой (б) при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{\text{ТК}} = 42000 \text{ мин}^{-1}$

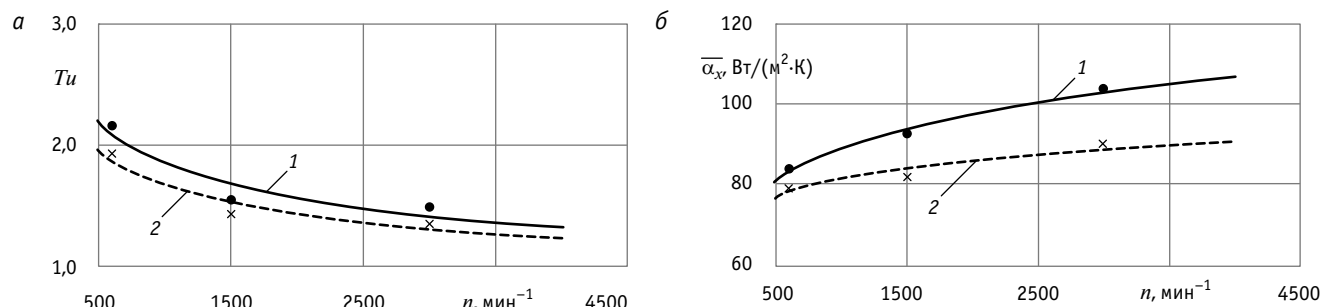


Рис. 3. Зависимости степени турбулентности Tu (а) и локального коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_x$ (б) от частоты вращения коленчатого вала двигателя n для базовой впускной системы (1) и системы впуска с выравнивающей решеткой (2) при $n_{\text{ТК}} = 42000 \text{ мин}^{-1}$

режимах работы, т.е. расход воздуха турбокомпрессора при $n_{\text{ТК}} = 50000 \text{ мин}^{-1}$ существенно превосходит расход воздуха поршневого двигателя при $n = 600\text{--}1500 \text{ мин}^{-1}$. Вследствие этого во впускной системе возникают обратные волны давления и интенсивные вторичные вихри, которые являются источником газодинамических флуктуаций потока воздуха. В свою очередь, установка выравнивающей решетки приводит к сглаживанию этих колебательных явлений в пульсирующем потоке во впускной системе поршневого ДВС с ТК.

Следует подчеркнуть, что наличие выравнивающей решетки во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором не приводит к снижению расхода воздуха через цилиндры двигателя. Отличия в расходных характеристиках составляют 4–6 %. Это характерно для всех исследуемых режимов работы ДВС и ТК.

Установка выравнивающей решетки в выходной канал компрессора приводит к снижению интенсивности теплоотдачи в диапазоне от 5 до 15 % в зависимости от n и $n_{\text{ТК}}$ (см. рис. 3б). Показано, что с ростом частоты вращения ротора ТК происходит снижение интенсивности теплоотдачи во впускной системе с выравнивающей решеткой по сравнению с базовой системой. Так, при $n_{\text{ТК}} = 42000 \text{ мин}^{-1}$ среднее значение коэффициента теплоотдачи снижается примерно на 10 %, тогда как при $n_{\text{ТК}} = 50000 \text{ мин}^{-1}$ снижение составляет уже 12,5 %. По мнению авторов, снижение интенсивности теплоотдачи во впускной системе с выравнивающей решеткой связано со стабилизацией пульсирующего потока (уменьшением степени турбулентности), соответствующим выравнением ядра потока и сглаживанием пограничного слоя на внутренней поверхности трубопровода.

На основании полученных данных была выполнена оценка потенциальных положительных эффектов от применения выравнивающей решетки во впускной системе поршневого ДВС. Так, снижение интенсивности теплоотдачи между потоком и стенками трубопровода приводит к уменьшению тепловых напряжений в деталях и узлах поршневых ДВС, что положительно сказывается на их надежности. Применительно к автомобильному двигателю 4ЧН 8,2/7,1 была рассчитана интенсивность отказов для базовой и модернизированной впускных систем (рис. 4а). На основании этих данных была определена вероятность безотказной работы при наработке 3000 ч, которая выросла почти на 1 % (рис. 4б).

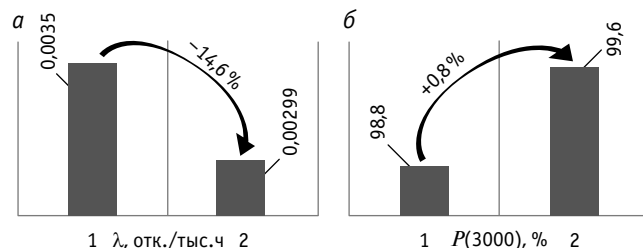


Рис. 4. Диаграммы изменения интенсивности отказов λ головок цилиндра (а) и вероятности их безотказной работы $P(3000)$ (б) для двигателя 4ЧН 8,2/7,1 с базовой впускной системой (1) и системой впуска с выравнивающей решеткой (2)

ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная установка и автоматизированная система сбора данных для исследования тепломеханических характеристик пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором.

2. Установлено, что наличие выравнивающей решетки в выходном канале компрессора приводит к стабилизации течения во впускной системе поршневого ДВС: 1) наблюдается сглаживание кривой $w_x = f(\tau)$; 2) происходит снижение степени турбулентности Ti вплоть до 25 % по сравнению с базовой впускной системой; 3) сохраняются расходные характеристики рабочего тела через цилиндры двигателя.

3. Показано, что установка выравнивающей решетки в выходном канале компрессора приводит к снижению интенсивности теплоотдачи во впускной системе поршневого ДВС с ТК вплоть до 15 % по сравнению с базовой системой. Это должно привести к снижению температурных напряжений в деталях впускной системы и соответственно улучшить надежность двигателя в целом [17].

4. Полученные данные расширяют теоретическую базу знаний о термозаконодательстве пульсирующих потоков в гидравлических системах сложной конфигурации. В практическом аспекте они могут использоваться при проектировании впускных систем для поршневых двигателей с перспективными эксплуатационными показателями.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Литература

1. Свистула А. Е. Двигатели внутреннего сгорания : учебное пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009. 81 с.
2. Watson N., Janota M. S. Turbocharging the Internal Combustion Engine. London : Palgrave Macmillan Press, 1982. 608 p.
3. Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T. Internal combustion engines : applied thermosciences. USA : John Wiley & Sons, 2016. 474 p.
4. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами типоразмера ТCR 14 // Двигателестроение. 2017. № 3 (269). С. 9–13. ISSN 0202–1633.

References

1. Svistula A. E. Internal combustion engines [Dvigateli vnutrennego sgoraniya] : textbook. Barnaul : Publishing House of Polzunov Altai State Technical University, 2009. 81 p.
2. Watson N., Janota M. S. Turbocharging the Internal Combustion Engine. London : Palgrave Macmillan Press, 1982. 608 p.
3. Ferguson C. R., Kirkpatrick A. T. Internal combustion engines : applied thermosciences. USA : John Wiley & Sons, 2016. 474 p.
4. Shestakov D. S., Pronin I. E. Fine tuning of locomotive engine type 8DM-21EL2M featuring turbocharger type TCR 14 [Dovodka rabocheho protsesssa teplovoznykh dizeley 8DM-21EL2M s turbokompressorami tipo-

5. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ЧН21/21 с российскими турбокомпрессорами ТКР180 // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815–9400.
6. Жилкин Б. П., Шестаков Д. С., Плотников Л. В. Некоторые особенности газодинамики процесса впуска при наддуве поршневых ДВС // Тяжелое машиностроение. 2012. № 2. С. 48–51. ISSN 1024–7106.
7. Мухачев Г. А., Щукин В. К. Термодинамика и теплопередача : учебник. Москва : Высшая школа, 1991. 480 с.
8. Гришин Ю. А. Особенности взаимодействия импульсов потока в выпускной системе дизеля с турбиной турбокомпрессора // Грузовик. 2018. № 6. С. 3–9. ISSN 1684–1298.
9. Ципленкин Е. Ц., Иовлев В. И. Оптимальный уровень форсировки поршневых ДВС наддувом // Двигателестроение. 2017. № 4 (270). С. 19–20. ISSN 0202–1633.
10. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances / Q. Tang, J. Fu, J. Liu et al. // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 93. Pp. 797–812.
11. Снижение пульсаций потока во впускной системе поршневого ДВС с наддувом / Д. С. Шестаков, Л. В. Плотников, Б. П. Жилкин, Н. И. Григорьев // Двигателестроение. 2013. № 1 (251). С. 24–27. ISSN 0202–1633.
12. Wang T. J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. Vol. 32. No. 7. Pp. 3465–3472.
13. Майорова Ю. А., Пронина А. К., Путилин К. П. Моделирование дизель-генераторной установки с турбонаддувом двигателем постоянного тока // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 2. С. 39–44. ISSN 2413–5526.
14. Вершина Г. А., Быстренков О. С. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 5. С. 383–390. ISSN 2227–1031.
15. Khairuddin U. B., Costall A. W. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140. No. 5. Article number 052801.
16. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 160. Article number 114123.
17. Плотников Л. В., Жилкин Б. П., Бродов Ю. М. Экспериментальное исследование и совершенствование процессов газообмена поршневых и комбинированных ДВС в условиях газодинамической нестационарности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 12 (669). С. 35–44. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-12-35-44. ISSN 0536–1044.
- razmera TCR 14] // Engines construction. 2017. No. 3 (269). Pp. 9–13. ISSN 0202–1633.
5. Shestakov D. S., Pronin I. E. Adjustment of operation of 8ChN 21/21 diesel locomotive engines with Russian TKR 180 turbochargers [Dovodka rabocheho protsessa teplovoznnykh dizeley 8ChN 21/21 s rossiyskimi turbokompressorami TKR 180] // Transport of the Urals. 2015. No. 4 (47). Pp. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815–9400.
6. Zhilkin B. P., Shestakov D. S., Plotnikov L. V. Some of characteristics of admission process of inlet process in supercharged internal combustion engines [Nekotorye osobennosti gazodinamiki protsessa vpuska pri nadduve porshnevnykh DVS] // Heavy machinery. 2012. No. 2. Pp. 48–51. ISSN 1024–7106.
7. Mukhachev G. A., Shhukin V. K. Thermodynamics and heat transfer [Termodynamika i teploperedacha] : textbook. Moscow : Higher School, 1991. 480 p.
8. Grishin Yu. A. Peculiarities of interaction of flow pulses in the diesel engine exhaust system with the turbocharger turbine [Osobennosti vzaimodeystviya impul'sov potoka v vypusknoy sisteme dizelya s turbinoy turbokompressora] // Gruzovik. 2018. No. 6. Pp. 3–9. ISSN 1684–1298.
9. Tsiplenkin E. Ts., Iovlev V. I. Engine boost optimum level [Optimal'nyy uroven' forsirovki porshnevnykh DVS nadduvom] // Engines construction. 2017. No. 4 (270). Pp. 19–20. ISSN 0202–1633.
10. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances / Q. Tang, J. Fu, J. Liu et al. // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 93. Pp. 797–812.
11. Mitigation of air flow pulsation in turbocharged engine suction system [Snizhenie pul'satsiy potoka vo vpusknoy sisteme porshnevogo DVS s nadduvom] / D. S. Shestakov, L. V. Plotnikov, B. P. Zhilkin, N. I. Grigoryev // Engines construction. 2013. No. 1 (251). Pp. 24–27. ISSN 0202–1633.
12. Wang T. J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. Vol. 32. No. 7. Pp. 3465–3472.
13. Mayorova Yu. A., Pronina A. K., Putilin K. P. Simulation of turbocharged diesel generator set by direct current motor [Modelirovanie dizel'-generatornoy ustanovki s turbonadduvm dvigatelem postoyannogo toka] // Power installations and technologies. 2018. Vol. 4. No. 2. Pp. 39–44. ISSN 2413–5526.
14. Vershina G. A., Bystrenkov O. S. Methods for organization of working process for gas-diesel engine [Sposoby organizatsii rabocheho protsessa gazodizel'nogo dvigatelya] // Science and Technique. 2017. Vol. 16. No. 5. Pp. 383–390. ISSN 2227–1031.
15. Khairuddin U. B., Costall A. W. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140. No. 5. Article number 052801.
16. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 160. Article number 114123.
17. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P., Brodov Yu. M. Experimental study and improvement of gas exchange processes in piston and combined internal combustion engines in unsteady gas-dynamic conditions [Eksperimental'noe issledovanie i sovershenstvovanie protsessov gazoobmena porshnevnykh i kombinirovannykh DVS v usloviyakh gazodinamicheskoy nestatsionarnosti] // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2015. No. 12 (669). Pp. 35–44. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-12-35-44. ISSN 0536–1044.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 625.151.033

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Вадим Вадимович Королев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ирина Викторовна Шишкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Михаил Евгеньевич Березовский, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), магистр, Москва, Россия

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО БОКОВОМУ ПУТИ ДЛЯ ПОЛОГИХ МАРОК СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vadim Vadimovich Korolev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Irina Viktorovna Shishkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Mikhail Evgenyevich Berezovskiy, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), master, Moscow, Russia

Calculation of the speed of movement on the side track for flat grades of switches

Аннотация

В настоящее время назрела необходимость ускорить проектирование и внедрение на эксплуатируемой сети железных дорог стрелочных переводов, позволяющих значительно повысить допускаемые скорости движения поездов, особенно на боковой путь. Одна из важнейших задач в проектировании таких стрелочных переводов — обеспечить при движении поезда на боковой путь комфортабельные условия для пассажиров за счет ограничения величин так называемого центробежного ускорения и приращения (изменения) центробежного ускорения в единицу времени (секунду). В случае необходимости реализовать скорость движения по стрелочному переводу на боковой путь свыше 50 км/ч основным фактором при определении радиуса переводной кривой по условиям комфортабельности является ограничение величины приращения (изменения) центробежного ускорения в единицу времени (секунду). Исходя из этого при проектировании стрелочных переводов для высоких скоростей движения в качестве переводной кривой целесообразно применять кривые переменного радиуса.

Ключевые слова: стрелочный перевод, боковой путь, скорость движения, радиус переводной кривой, основной фактор, кривые переменного радиуса.

Summary

There is a need to speed up the design and implementation of switches on the operated railway network, which can significantly increase the allowed speed of trains, especially on the side track. One of the starting points in the design of switches for high speeds is to provide passengers with a comfortable ride when the train is moving on a side track by limiting the values of the so-called centrifugal acceleration and the increment (change) of the centrifugal acceleration per unit of time (second). If it is necessary to implement the speed of movement on the switch to the side track over 50 km/h, the main factor in determining the radius of the transfer curve under the conditions of driving comfort is to limit the amount of increment (change) of the centrifugal acceleration per unit of time (second). Based on this, when designing switches for high speeds, it is advisable to use curves of variable radius as a translation curve.

Keywords: arrow translation, side track, speed, radius of the translation curve, the main factor, curves of variable radius.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-52-56

В связи с неуклонно возрастающим объемом перевозок по российским железным дорогам возникает необходимость в значительном повышении скоростей движения как грузовых, так и пассажирских поездов. Решение этих вопросов выдвигает, в свою очередь, ряд задач по улучшению конструкции и состояния стрелочного хозяйства.

Сегодня уже назрела необходимость форсировать проектирование и внедрение на эксплуатируемой сети железных дорог стрелочных переводов, позволяющих значительно повысить допускаемые скорости движения поездов, особенно на боковой путь [1, 2].

Одна из ключевых позиций проектирования стрелочных переводов для высоких скоростей движения — обеспечить пассажирам комфортабельные условия при движении поезда на боковой путь за счет ограничения величин так называемого центробежного ускорения a и приращения (изменения) центробежного ускорения в единицу времени (секунду) ψ . Исходя из этого переводная кривая должна удовлетворять требованиям, чтобы появляющиеся центробежные ускорения [3, 4], а также их приращение (изменение) в единицу времени (секунду) не превышали некоторых установленных величин:

$$a \leq a_{\text{доп}};$$

$$\psi \leq \psi_{\text{доп}};$$

где a — величина непогашенного центробежного ускорения, м/с^2 ;

ψ — величина изменения непогашенного центробежного ускорения в единицу времени (секунду), м/с^3 .

На основании проведенных исследований по проверке условий комфортабельности езды при движении пассажирского поезда по стрелочному переводу на боковой путь допустимыми в кузове вагона можно считать центробежное ускорение $a = 1,0 \text{ м/с}^2$, а его приращение (изменение) в единицу времени $\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$, поскольку их воздействие в пределах переводных кривых будет кратковременным и будет повторяться через сравнительно большие промежутки времени.

На сети российских железных дорог широкое распространение получили стрелочные переводы с переводными кривыми постоянного радиуса. В стрелочном переводе последней конструкции из рельсов типа Р50 с крестовиной марки 1/18 радиус острья до сечения 40 мм составляет 1698,0 м, а далее по острю и переводной кривой — 960,0 м. Допускаемая скорость движения поездов на боковой путь данного стрелочного перевода из условий обеспечения пассажирам комфортабельной езды в соответствии с экспериментальными данными, полученными в лаборатории «Стрелочное хозяйство» ВНИИЖТа, может быть установлена в пределах 80–85 км/ч.

В своей работе [5] профессор Г. М. Шахунянц отмечал, что допускаемые скорости движения по стрелочным переводам на боковой путь должны назначаться с таким расчетом, чтобы в результате взаимодействия пути и подвижного состава не возникали недопустимые воздействия ни на подвижной состав, ни на пассажиров.

При установленных допустимых величинах непогашенного центробежного ускорения, изменения центробежного уско-

рения в единицу времени и потери кинетической энергии на удар при въезде на стрелку взаимозависимыми и определяющими основные параметры стрелочного перевода являются скорость движения поезда и радиус переводной кривой [6, 7]. В приведенных ниже расчетах заданной принимается скорость движения, а радиус переводной кривой определяется в функции от скорости [8, 9].

Как известно, величина непогашенного центробежного ускорения при движении экипажа в кривой радиуса R , имеющей возвышение наружного рельса h , может быть определена по формуле

$$a_{\text{н}} = \frac{V^2}{R} - \frac{gh}{S_1},$$

где V — скорость движения экипажа по боковому направлению, м/с ;

R — радиус кривой бокового направления, мм ;

g — ускорение, м/с^2 ;

h — возвышение наружного рельса, мм ;

S_1 — ширина междупутья бокового направления, мм .

При отсутствии возвышения наружного рельса, что обычно имеет место в переводных кривых, величина центробежного ускорения будет определяться по формуле

$$a_{\text{н}} = \frac{V^2}{R}.$$

Приняв $a = 1,0 \text{ м/с}^2$ и переводной коэффициент $3,6^2$, получим выражение для определения $R_{\text{мин}}$ из условий ограничения величины центробежного ускорения, м :

$$R_{\text{мин}} = \frac{V^2}{3,6^2 \cdot 1,0} = 0,0772V^2.$$

Профессор П. Г. Козийчук [10] предложил определять приращение центробежного ускорения при въезде на стрелку (при $R = \text{const}$) по формуле

$$\psi = \frac{V^3}{Rb}.$$

Приняв $\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$ и $b = 17,0 \text{ м}$ (расстояние между осями вращения поворотных тележек в цельнометаллических вагонах), а также введя для удобства пользования формулой переводной коэффициент $3,6^3$, получим выражение для определения $R_{\text{мин}}$ из условий ограничения величины приращения (изменения) центробежного ускорения в единицу времени (секунду), м :

$$R_{\text{мин}} = \frac{V^3}{3,6^3 \cdot 0,8 \cdot 17} = 0,00158V^3.$$

Таким образом, минимальная величина радиуса переводной кривой (в случае $R = \text{const}$) при установленной скорости движения для обеспечения комфортабельности езды будет определяться:

по условиям ограничения величины центростремительного ускорения — из выражения $R_{\min} = 0,0772 V^2 \text{ м}$;

по условиям ограничения величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени (секунду) — из выражения $R_{\min} = 0,00158 V^3 \text{ м}$.

Результаты расчета значений минимальных радиусов в зависимости от скорости движения поезда на боковой путь приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет значений минимальных радиусов в зависимости от скорости движения поезда на боковой путь

Скорость движения поезда на боковой путь, км/ч	$R_{\min}, \text{ м}$	
	из условий ограничения величины центростремительного ускорения ($a = 1,0 \text{ м/с}^2$)	из условий ограничения величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени ($\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$)
1	2	3
40	123,52	101,12
50	193,00	197,12
60	277,92	341,28
70	378,28	541,94
80	494,08	808,96
90	625,32	1151,82
100	772,00	1580,00
110	934,12	2102,98
120	1111,68	2730,24
130	1304,68	3471,26
140	1513,12	4335,52
150	1737,00	5332,50
160	1976,32	6471,68

По данным табл. 1 построен график значений R_{\min} в зависимости от скорости движения поезда по переводной кривой при принятых $a = 1,0 \text{ м/с}^2$ и $\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$ (рис. 1).

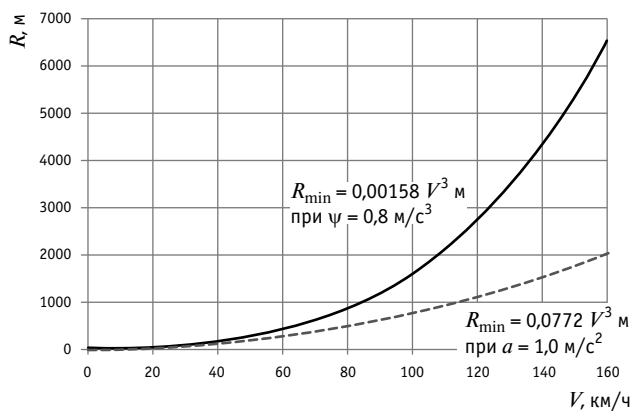


Рис. 1. График результатов подсчетов значений минимальных радиусов в зависимости от скорости движения поезда на боковой путь

Из графика видно, что при скорости движения по боковому пути до 50 км/ч возможный минимальный радиус переводной кривой определяется ограничением величины центростремительного ускорения, а при скорости более 50 км/ч — ограничением величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени. Отсюда можно заключить, что в стрелочных переводах для высоких скоростей движения параметры переводной кривой будут в первую очередь определяться ограничением величины изменения центростремительного ускорения в единицу времени. В этом случае в качестве переводных кривых особенно целесообразно применять кривые переменной кривизны, изменение кривизны в которых отвечает требованиям монотонного приращения (изменения) величины центростремительного ускорения.

В кривой переменной кривизны, отвечающей этим требованиям, обеспечивается менее резкое, нежели в кривой постоянного радиуса, влияние факторов (изменений ускорений во времени), особенно неприятно воздействующих на организм человека, что очень существенно при реализации высоких скоростей движения пассажирских поездов.

На целесообразность использования кривых переменного радиуса в стрелочных переводах для высоких скоростей движения указывают в своих исследованиях такие ученые, как П. Г. Козийчук [10], С. В. Амелин [11], Г. И. Иващенко [12] и др.

Известно, что переводная кривая с переменной кривизной в стрелочных переводах пологих марок может состоять из одной или двух ветвей переходной кривой или может быть составлена из двух переходных кривых и вставки между ними кривой постоянного радиуса.

В переводной кривой переменного радиуса, изменяющегося от $\rho = 0$ до $\rho = R$, минимальное значение радиуса из условия ограничения величины центростремительного ускорения будет определяться так же, как и для кривой постоянного радиуса.

Поэтому значения R_{\min} для кривых переменного радиуса, определяемые из условий ограничения величины центростремительного ускорения, будут соответствовать при различных скоростях данным, приведенным в табл. 1 (графа 2).

Изменение центростремительного ускорения в единицу времени ψ в кривых переменного радиуса, в пределах которых центростремительное ускорение возрастает от $a = 0$ до некоторой конечной величины $a = \frac{V^2}{R}$, профессор Б. Н. Веденисов [13] предложил определять следующим образом: если $a = \frac{V^2}{R}$, а $\psi = \frac{da}{dt}$, то

$$\psi = \frac{d\left(\frac{V^2}{R}\right)}{dt}.$$

При $\rho = R$ величина изменения центростремительного ускорения в единицу времени будет определяться из выражения

$$\psi = \frac{V^2}{Rt},$$

где $t = \frac{l}{V}$, здесь l — теоретическая длина ветви переходной кривой, м.

Таблица 2

$$\text{Тогда } \psi = \frac{V^3}{Rt}, \text{ откуда } l = \frac{V^3}{\psi R}.$$

Принимая $\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$ и вводя переводной коэффициент $3,6^3$ для удобства пользования формулой, получим, м:

$$l = \frac{V^3}{3,6^3 \cdot 0,8 \cdot R} = 0,0268 \frac{V^3}{R},$$

где V — скорость движения поезда, км/ч;

R — наименьшее значение радиуса переводной кривой, м.

Для различных скоростей движения поезда и соответствующих им R_{\min} из условий ограничения величины центростремительного ускорения, принятых по табл. 1 (графа 2), выполнен расчет длины ветви переходной кривой из условий ограничения величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что при принятых значениях R_{\min} из условий ограничения величины центростремительного ускорения теоретическая длина ветви переходной кривой, определяемая из условий ограничения величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени, при увеличении скорости движения возрастает существенно меньше, чем значение радиуса круговой кривой (см. табл. 1, графа 3). Это подтверждает, что в стрелочных переводах для высоких скоростей движения целесообразно применять в качестве переводной кривой кривые переменной кривизны.

Марки крестовины в обыкновенных и симметричных стрелочных переводах для высоких скоростей движения рекомендовано принимать по этапам: 1/18, 1/22 и 1/36 [14, 15].

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующий вывод: в случае если необходимо реализовать скорость движения по стрелочному переводу на боковой

Результаты расчета длины ветви переходной кривой

Скорость движения поезда на боковой путь, км/ч	Значение R_{\min} из условий ограничения величины центростремительного ускорения ($a = 1,0 \text{ м/с}^2$), м	Теоретическая длина ветви переходной кривой из условий ограничения величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени ($\psi = 0,8 \text{ м/с}^3$), м
1	2	3
40	124	13,83
50	193	17,36
60	278	20,82
70	378	24,32
80	494	27,78
90	625	31,26
100	772	34,71
110	934	38,19
120	1112	41,65
130	1305	45,12
140	1513	48,60
150	1737	52,07
160	1976	55,55

путь свыше 50 км/ч, основным фактором при определении радиуса переводной кривой по условиям комфортабельности езды является ограничение величины приращения (изменения) центростремительного ускорения в единицу времени (секунду). Исходя из этого при проектировании стрелочных переводов для высоких скоростей движения в качестве переводной кривой целесообразно применять кривые переменного радиуса.

Литература

1. Королев В. В. Подготовка технических средств и нормативной документации по стрелочному хозяйству для линий высокоскоростного движения // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 14. № 14 (14). С. 21–26.
2. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б. Э. Глюзберг, Н. В. Зверкова, В. В. Королев, И. В. Шишкина // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 20–22. ISSN 0131–5765.
3. Королев В. В. Напряженное состояние контррельсов криволинейного стрелочного перевода // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2008. Т. 1. № 1 (1). С. 11–15.
4. Применение методов моделирования для определения скоростей движения по участкам пути, на которых расположены комбинации стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев [и др.] // История и перспективы развития транспорта на севере России : сборник материалов научно-технической конференции. 2018. № 1. С. 73–78.

References

1. Korolev V. V. Preparation of technical means and normative documentation on switch economy for high-speed traffic lines [Podgotovka tekhnicheskikh sredstv i normativnoy dokumentatsii po strelochnomu khozyaystvu dlya liniy vysokoskorostnogo dvizheniya] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2019. Vol. 14. No. 14 (14). Pp. 21–26.
2. Stages of designing technical means of railway infrastructure [Etapy projektirovaniya tekhnicheskikh sredstv infrastruktury zheleznnykh dorog] / B. E. Gluzberg, N. V. Zverkova, V. V. Korolev, I. V. Shishkina // Railway Track and Facilities. 2018. No. 2. Pp. 20–22. ISSN 0131–5765.
3. Korolev V. V. The stress state of the counter-rails of a curved switch [Napryazhennoe sostoyanie kontrrel'sov krivolineynogo strelochnogo perevoda] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2008. Vol. 1. No. 1 (1). Pp. 11–15.
4. Application of modeling methods for determining the speed of movement along the sections of the path on which combinations of switches are located [Primenenie metodov modelirovaniya dlya opredeleniya skorostey dvizheniya po uchastkam puti, na kotorykh raspolozheny kombinatsii strelochnykh perevodov] / B. E. Gluzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev et al. // History and prospects of transport development in the North of Russia : proceedings of research and technical conference. 2018. No. 1. Pp. 73–78.

5. Шахунянц Г. М. О допускаемых скоростях движения на боковой путь и об основных геометрических параметрах для проектирования стрелочных переводов // Труды МИИТа. 1955. Вып. 80/1.
6. Korolev V. Switching shunters on a slab base // TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum, AISC 1116, 2020. Pp. 175–187.
7. Королев В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 77–87. ISSN 2074–9325.
8. Korolev V. Guard rail operation of lateral path of railroad switch // TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Pp. 621–638. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_60.
9. Особенности динамического контакта колеса и рельса при высокоскоростном движении / А. Я. Коган, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.] // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : сборник трудов : в 4-х томах. 2019. С. 119–121.
10. Козийчук П. Г. К проектированию стрелочных переводов для скоростного транспорта : сборник научных трудов / Всесоюзная академия железнодорожного транспорта. Москва : Трансжелдориздат, 1940. Вып. И.
11. Амелин С. В. Основы проектирования стрелочных переводов для высоких скоростей движения : сборник материалов VI научно-технической конференции по вопросам путевого хозяйства. Ленинград : Лениздат, 1958.
12. Иващенко Г. И. Стрелочные переводы для повышенных скоростей движения по ответвленному пути. Основные параметры // Труды ЦНИИ МПС. 1960. Вып. 193.
13. Веденисов Б. Н. О переходных кривых при больших скоростях движения // Труды МИИТа. 1936. Вып. 47.
14. Королев В. В. Перспективные разработки стрелочных переводов для российских железных дорог // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сборник материалов XIV научно-технической конференции. Москва, 2017. С. 193–194.
15. Королев В. В. Стрелочные переводы для высокоскоростного движения свыше 250 км/ч // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : сборник материалов научно-технической конференции с международным участием. Москва, 2015. Т. 8. № 8 (8). С. 96–100.
5. Shakhunyants G. M. On the permissible speeds of movement on the side path and on the main geometric parameters for the design of switches [O dopuskaemykh skorostyakh dvizheniya na bokovoy put' i ob osnovnykh geometricheskikh parametrokh dlya proektirovaniya strelochnykh peregodov] // Works of MIIT. 1955. Issue 80/1.
6. Korolev V. Switching shunters on a slab base // TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum, AISC 1116, 2020. Pp. 175–187.
7. Korolev V. V. Modeling of switches on a plate base [Modelirovanie strelochnykh peregodov na plitnom osnovanii] // Science and technology in transport. 2019. No. 3. Pp. 77–87. ISSN 2074–9325.
8. Korolev V. Guard rail operation of lateral path of railroad switch // TransSiberia 2019: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Pp. 621–638. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_60.
9. Features of dynamic contact of a wheel and a rail in high-speed traffic [Osobennosti dinamicheskogo kontakta koleasa i rel'sa pri vysokoskorostnom dvizhenii] / A. Ya. Kogan, V. V. Korolev, A. A. Loktev et al. // XII All-Russian congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics : collection of proceedings : in 4 volumes. 2019. Pp. 119–121.
10. Koziychuk P. G. To the design of switches for high-speed transport [K proektirovaniyu strelochnykh peregodov dlya skorostnogo transporta] : collection of scientific papers / All-Union Academy of Railway Transport. Moscow : Transzheldorizdat, 1940. Issue I.
11. Amelin S. V. Fundamentals of design of switches for high traffic speeds [Osnovy proektirovaniya strelochnykh peregodov dlya vysokikh skorostey dvizheniya] : collection of proceedings of VI research and technical conference on track facilities. Leningrad : Lenizdat, 1958.
12. Ivashchenko G. I. Switches for increased speeds of movement on the branch path. (Main parameters) [Strelochnye peregody dlya povyshennykh skorostey dvizheniya po otvetvlenному puti. (Osnovnye parametry)] // Works of TsNII MPS. 1960. Issue 193.
13. Vedenisov B. N. About transition curves at high speeds [O perekhodnykh krivykh pri bol'shikh skorostyakh dvizheniya] // Works of MIIT. 1936. Issue 47.
14. Korolev V. V. Perspective developments of switches for Russian Railways [Perspektivnye razrabotki strelochnykh peregodov dlya rossiyskikh zheleznnykh dorog] // Modern problems of design, construction and operation of railway tracks : collection of proceedings of XIV research and technical conference. Moscow, 2017. Pp. 193–194.
15. Korolev V. V. Switches for high-speed traffic over 250 km/h [Strelochnye peregody dlya vysokoskorostnogo dvizheniya svyshe 250 km/h] // Implementation of modern structures and advanced technologies in track facilities : collection of proceedings of research and technical conference with international participation. Moscow, 2015. Vol. 8. No. 8 (8). Pp. 96–100.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 629.423

Александр Сергеевич Мазнев, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Александр Александрович Киселев, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Владимир Андреевич Усов, кандидат технических наук, доцент, Екатеринбург, Россия,

Анна Андреевна Калинина, инженер кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexander Sergeevich Maznev, DSc in Engineering, Professor, Electric Power Traction Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Alexander Alexandrovich Kiselev, postgraduate student, Electric Power Traction Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Vladimir Andreevich Usov, PhD in Engineering, Associate Professor, Ekaterinburg, Russia,

Anna Andreevna Kalinina, Engineer, Electric Power Traction Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Prospects of improving technical and economic indicators of electric rolling stock

Аннотация

Рассмотрены способы улучшения технико-экономических показателей электрического подвижного состава постоянного тока. Предложена схема электропривода с импульсными преобразователями, управляемыми по мгновенным значениям токов якоря и возбуждения. Схема обеспечивает реализацию рекуперативно-реостатного торможения практически на всем скоростном диапазоне. Приведены частотные характеристики преобразователей при скоростях движения от 5 до 100 км/ч. Предложена схема электровоза постоянного тока с импульсным регулированием напряжения на трех соединениях тяговых двигателей. Рассмотрена структура автономного инвертора напряжения с групповой коммутацией и уменьшенным числом полностью управляемых полупроводниковых приборов. Приведены способы предупреждения боксования колесных пар за счет изменения их нагрузки на рельсы и возбуждения тяговых двигателей.

Ключевые слова: электрический подвижной состав, полупроводниковые преобразователи, энергоэффективность, тяговые свойства.

Summary

The paper considers methods of improving technical and economic indicators of direct current electric rolling stock. The authors propose a scheme of electric drive with pulse converters that are controlled by instantaneous values of armature and exciting currents. The scheme provides the realization of regenerative and resistance braking on almost the entire speed range. The paper also presents frequency characteristics of converters at speed from 5 to 100 km/h and proposes a scheme of direct current electric locomotive with pulse regulation of voltage on three connections of traction motors. Moreover, the authors discuss a structure of autonomous voltage inverter with group switching and reduced number of fully controlled semiconductor devices and present methods to prevent wheelspin through changing their load on rails and excitement of traction motors.

Keywords: electric rolling stock, semiconductor converters, energy efficiency, traction properties.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-57-64

ВВЕДЕНИЕ

Электрический транспорт России развивается по нескольким направлениям, которые характеризуются родом тока и уровнем напряжения источников питания. На магистральных железных дорогах применяется контактная сеть постоянного и переменного тока с напряжением 3,3 и 25 кВ промышленной частоты (50 Гц) соответственно. Для городского электротранспорта и метрополитена выбраны источники постоянного тока напряжением 600 и 825 В. Подвижной состав промышленного транспорта эксплуатируется на участках переменного или постоянного тока с напряжением 10 и 1,5 кВ. На всех видах транспортных средств используются тяговые электродвигатели (ТЭД) постоянного и пульсирующего тока (преимущественно), асинхронные и вентильные (последние — в качестве опытных образцов) [1]. Для регулирования скорости электроподвижного состава (ЭПС) с коллекторными двигателями применяются системы управления на основе контакторов, групповых переключателей и резисторов.

Силовая электроника и микропроцессорные системы управления существенно расширяют возможности совершенствования ЭПС, позволяют изменить его параметры и характеристики. Снижение расхода энергии на тягу достигается за счет

повышения коэффициентов мощности и полезного действия преобразователей и тяговых двигателей, выбора рациональных структур силовых цепей, более эффективного применения рекуперативного торможения и использования тяговых свойств подвижного состава. Например, импульсное регулирование напряжения при пуске и торможении электровозов позволяет увеличить массу составов на 8–12 %, а на тяговом асинхронном приводе возможно увеличить силу тяги и реализуемый коэффициент сцепления на 5–10 % [2].

В статье рассмотрены некоторые технические решения, использование которых позволяет улучшить технико-экономические показатели ЭПС постоянного тока за счет совершенствования систем управления, применения рекуперативного торможения в более широком диапазоне скоростей движения, новой элементной базы и структур силовых цепей. С помощью последних возможно изменять параметры тяговых двигателей в соответствии с экономической целесообразностью и более эффективно реализовывать тяговые свойства подвижного состава.

МНОГОРЕЖИМНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 1 изображена схема с импульсным преобразователем, обеспечивающим реализацию безреостатного пуска, рекуперативного и реостатного торможения с самовозбуждением (в зависимости от мощности потребителя электроэнергии) и торможения противовключением на скоростях движения от 5 км/ч до полной остановки [3, 4].

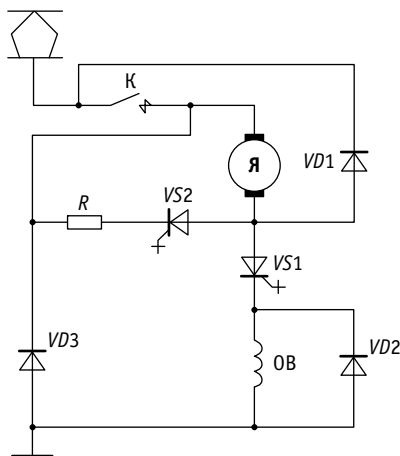


Рис. 1. Принципиальная схема многорежимного преобразователя постоянного тока

Максимальная начальная скорость $v_{кр}$ импульсного рекуперативного торможения ограничена значением $v_{кр}$, зависящим от напряжения источника питания U_d , параметров и числа N последовательно включенных в схему тяговых двигателей:

$$v_{кр} = \frac{U_d + I_d \cdot \sum R_d}{N \cdot C_v \cdot \Phi}, \quad (1)$$

где I_d , $\sum R_d$, Φ и C_v — ток, сопротивление обмоток, магнитный поток и конструкционная постоянная тягового двигателя.

С целью повышения скорости начала торможения предложена схема, представленная на рис. 2 [5].

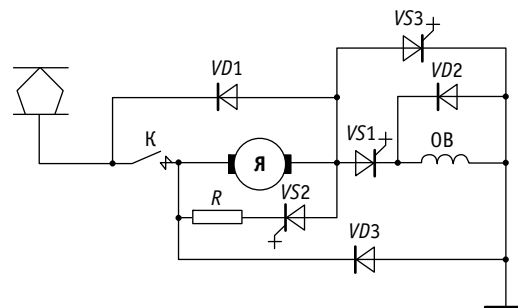


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя с дополнительным «ключом» (VS3)

Полностью управляемый ключевой прибор VS3 обеспечивает регулирование возбуждения тяговых двигателей независимо от тока якоря. Помимо расширения диапазона регулирования скорости, он позволяет упростить силовую схему вагона за счет исключения трехфазного выпрямителя для питания обмоток возбуждения, генератора и приводного двигателя. При соблюдении условий, необходимых для применения рекуперативного торможения, из силовой схемы могут быть исключены тормозной резистор R и устройства, регулирующие величину его сопротивления [6].

Имитационная модель моторного вагона электропоезда ЭД4М, реализованная в программном пакете Simulink среды MATLAB, дает возможность оценить регулировочные свойства предложенных структур преобразователя.

Ниже приведены результаты моделирования силовой схемы, изображенной на рис. 1, в режиме торможения на скоростях, меньших и больших критической, при следующих условиях:

- 1) управление преобразователем VS1 осуществляется по мгновенному значению тока якоря, для которого заданы минимум и максимум, равные 340 и 360 А (средняя величина равна 350 А);
- 2) напряжение контактной сети U_d принято равным 3300 В;
- 3) суммарное сопротивление обмоток тяговых двигателей ТЭД-2У1 равняется

$$\begin{aligned} \sum R_d &= N \cdot (R_{я} + R_{дп} + R_{в}) = \\ &= 4 \cdot (0,0694 + 0,0245 + 0,1) = 0,7756 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где $R_{я}$, $R_{дп}$ и $R_{в}$ — сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов и возбуждения двигателя;

4) нагрузочная характеристика $C_v \Phi(I_d)$ двигателя ТЭД-2У1 определена по табл. 1 [7] и при среднем токе двигателя, равном 350 А, составит 20,75 В/км/ч.

В результате критическая скорость для двигателей ТЭД-2У1, рассчитанная по формуле (1), будет равна

$$v_{кр} = \frac{3300 + 350 \cdot 0,7756}{4 \cdot 20,75} = 43 \text{ км/ч}.$$

Таблица 1

Нагрузочная характеристика двигателя ТЭД-2У1

$I_{др}$, А	0	25	50	100	200	300	400	500
$C_{\psi\Phi}$, В/км/ч	0	4,2	8	12,7	17,6	20	21,5	22,7

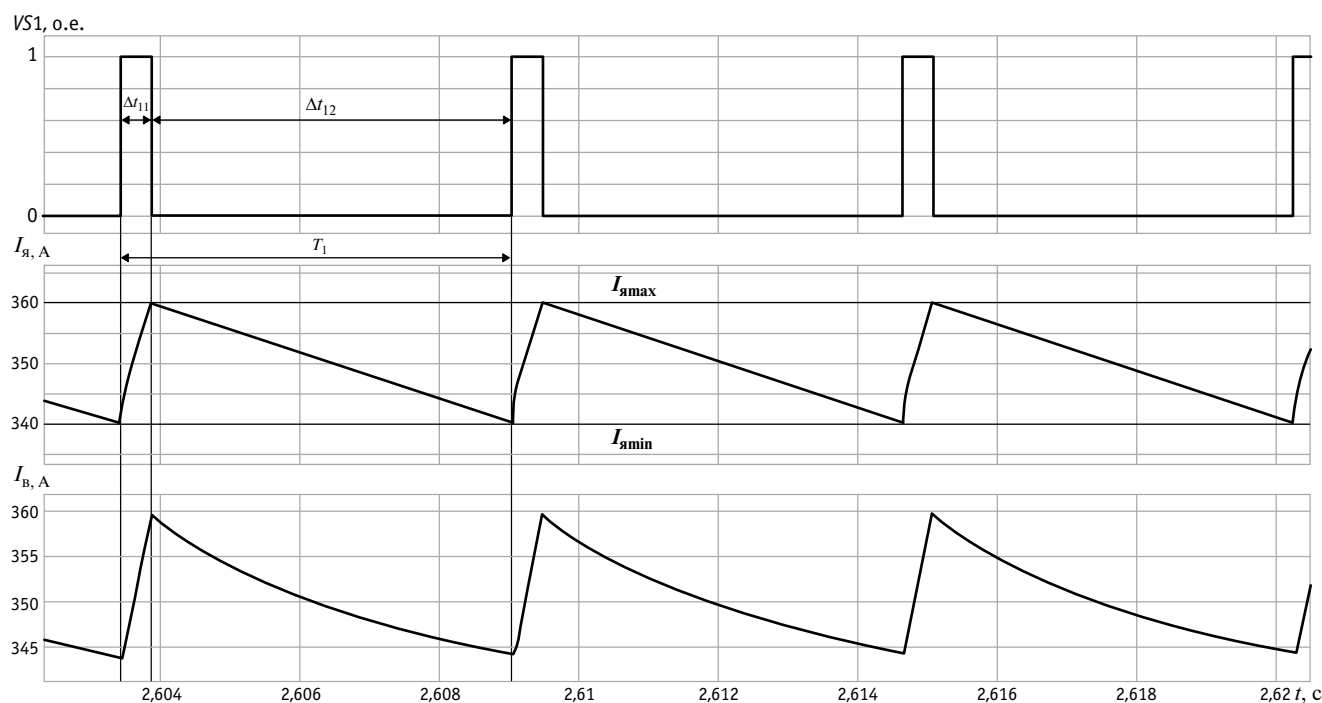


Рис. 3. Алгоритм управления импульсным преобразователем VS1, токи якорей $I_{я}$ и возбуждения $I_{в}$ при скорости 40 км/ч:
 Δt_{11} , Δt_{12} и T_1 — интервалы времени включенного, выключенного состояния преобразователя VS1 и период следования импульсов;
 $I_{я\min}$ и $I_{я\max}$ — минимальное и максимальное значения тока якоря

На рис. 3 изображены алгоритм управления преобразователем VS1 и временные диаграммы токов якорей и возбуждения двигателей при скорости движения 40 км/ч.

По результатам моделирования построена зависимость частоты преобразователя VS1 от скорости движения в диапазоне от 5 до 43 км/ч (рис. 4).

На рис. 5 изображены алгоритм управления преобразователем VS1 и временные диаграммы токов якорей и возбуждения при скорости движения 100 км/ч.

Частотная характеристика преобразователя в зависимости от скорости движения в диапазоне 43–100 км/ч представлена на рис. 6.

При скорости движения выше критической имеют место низкочастотные колебания тока якоря с амплитудой, существенно превышающей заданное максимальное значение, так как ток обмотки возбуждения при выключенном преобразователе VS1 уменьшается независимо от тока якоря (см. рис. 5). Частота изменения тока якоря с увеличением скорости снижается, при 100 км/ч ее значение составит 4,3 Гц (см. рис. 6) [8].

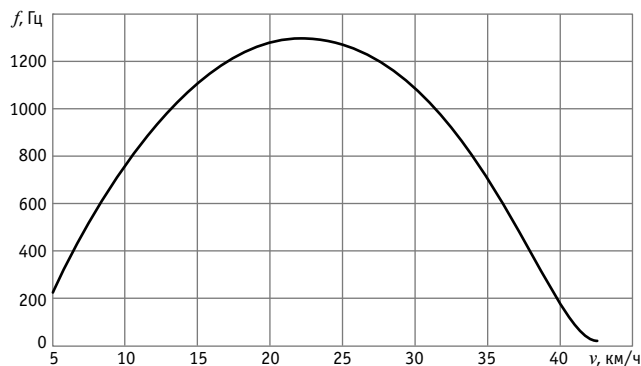


Рис. 4. Частотная характеристика $f(v)$ преобразователя VS1 до критической скорости

Из рис. 5 видно, что для поддержания тока якоря в заданных пределах на скорости движения 100 км/ч необходимо обеспечить значение тока возбуждения, приблизительно равное 50 А. Это может быть выполнено, если использовать дополнительный преобразователь VS3 (см. рис. 2).

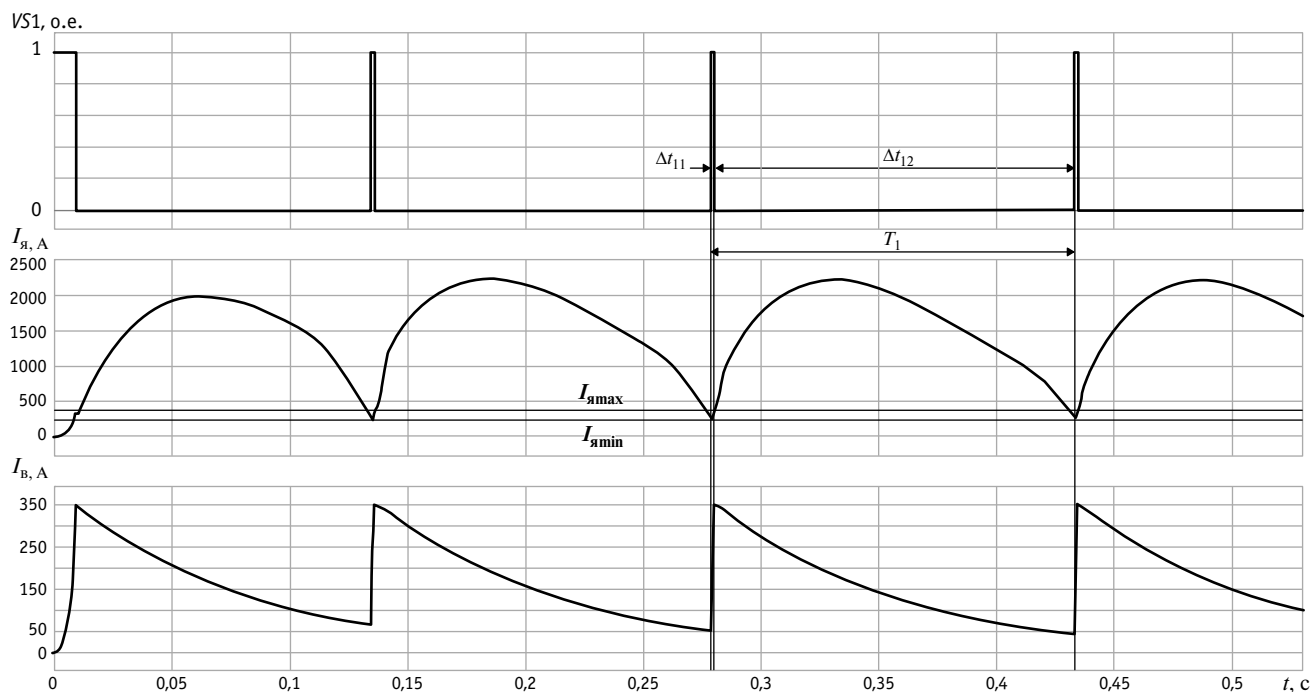


Рис. 5. Алгоритм управления импульсным преобразователем VS1, токи якорей $I_я$ и возбуждения $I_в$ при скорости 100 км/ч

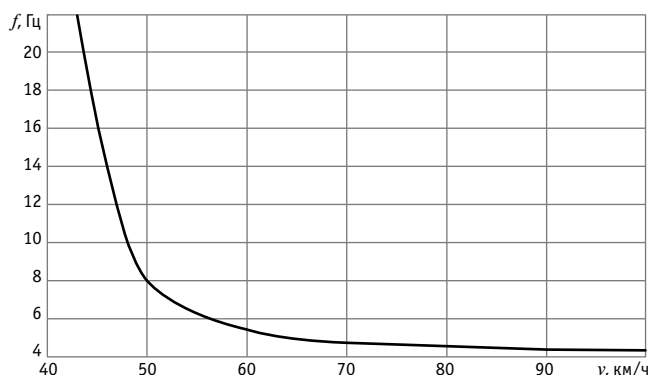


Рис. 6. Частотная характеристика $f(v)$ преобразователя при скорости выше критической

Ниже приведены результаты моделирования силовой схемы, изображенной на рис. 2, в режиме торможения при тех же условиях. Добавлено регулирование тока возбуждения по мгновенному значению с заданными максимумами и минимумами. На рис. 7 изображены алгоритмы управления преобразователей VS1 и VS3, временные диаграммы магнитного потока двигателя, токов якорей и возбуждения на скорости движения 100 км/ч. Минимальное и максимальное значения тока возбуждения для данной скорости заданы равными 46 и 56 А.

Преобразователи VS1 и VS3 позволяют осуществить раздельное регулирование токов якоря и возбуждения двигателей. Схема работает на скоростях движения выше критической, при меньших скоростях целесообразно использовать схему,

представленную на рис. 1. Преобразователь VS1 выключается по достижении максимального значения тока возбуждения, после чего включается преобразователь VS3. Частота изменения тока якоря определяется скоростью торможения (при заданных параметрах двигателя и напряжения сети). Из рис. 7 видно, что на высокой скорости торможения на частоту тока якоря влияют пульсации магнитного потока (так как не учтено влияние вихревых токов).

На рис. 8 изображены частотные характеристики преобразователей VS1 и VS3 в диапазоне скоростей от 43 до 100 км/ч.

Из рис. 8 видно, что соотношение $\frac{f_{VS3}}{f_{VS1}}$ частот преобразова-

телей VS3 и VS1 уменьшается в процессе рекуперативного торможения с 9,2 до 1,75. Частота преобразователя VS1 зависит от формы кривой намагничивания $C_v\Phi(I_B)$ тягового двигателя, а частота преобразователя VS3 — от скорости торможения v .

ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Электропоезда постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями и контактно-резисторной системой регулирования скорости необходимо модернизировать, что отмечается в ряде публикаций [9–11]. Применение импульсных преобразователей в схемах пуска позволяет либо увеличить число группировок ТЭД при сохранении пусковых резисторов (что повысит плавность пуска), либо исключить пусковые резисторы. Один из вариантов схемы с импульсным преобразователем и тремя группировками соединений тяговых двигателей представлен на рис. 9.

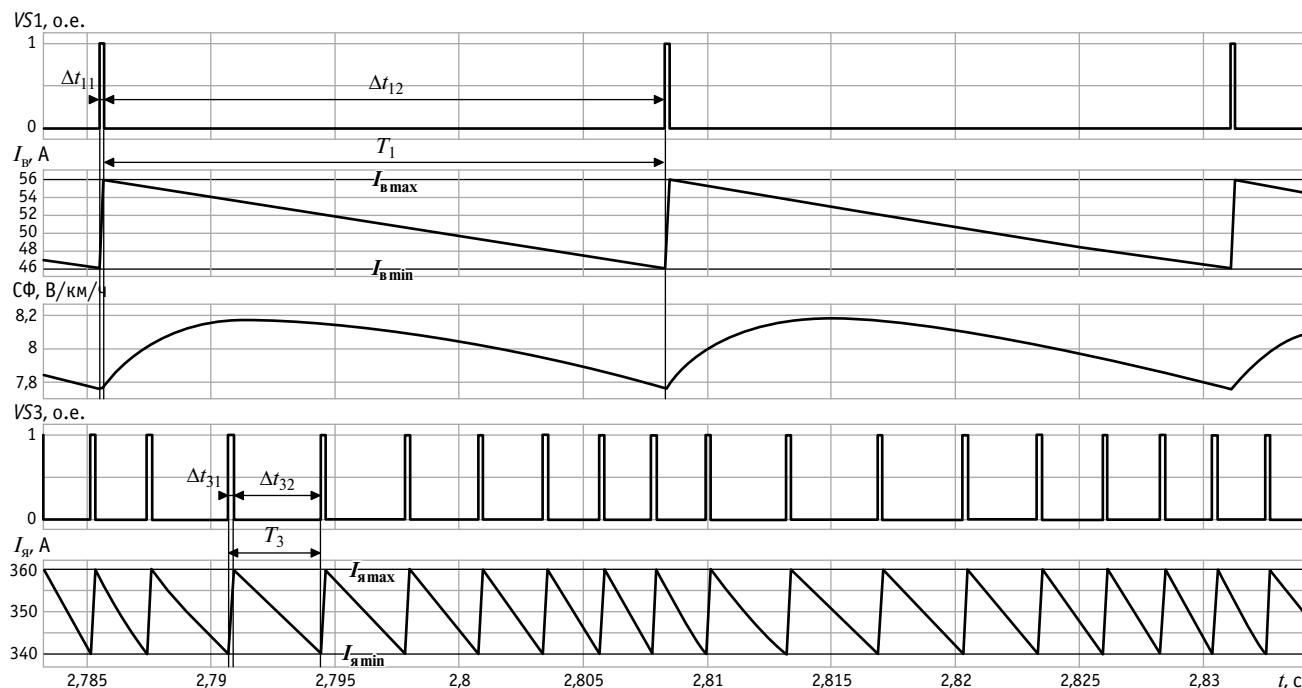


Рис. 7. Алгоритмы управления импульсными преобразователями VS1 и VS3, магнитный поток СФ двигателя, токи якорей I_A и возбуждения I_B при скорости 100 км/ч:

Δt_{31} , Δt_{32} и T_3 — интервалы времени включенного, выключенного состояния преобразователя VS3 и период следования импульсов

Питание двигателей при последовательном соединении осуществляется с помощью импульсного преобразователя ИП, отпираемого одновременно с тиристором Т1. После выключения преобразователя ИП токи тяговых двигателей замыкаются через разделительные Д1, Д2 и обратные Д3–Д6 диоды. Последовательно-параллельное соединение реализуется за счет включения контактора К5 и тиристора Т2 вместе с перечисленными выше приборами. Для перехода на параллельное соединение включаются контакторы К1–К4. При выключенном преобразователе ИП токи двигателей замыкаются через разделительные диоды Д1 и Д2. Коэффициент заполнения λ перед переходом на другое соединение тяговых двигателей уменьшается, обеспечивая плавность изменения силы тяги.

На рис. 10 приведены временные диаграммы сигнала k включения контакторов К1–К4, коэффициента заполнения λ преобразователя, токов первой I_1 и третьей I_3 групп тяговых двигателей при переходе на параллельное соединение двигателей ТЛ-2К на скорости движения 45 км/ч, полученные с помощью моделирования в программном пакете Simulink среды MATLAB.

Из рис. 10 видно, что переход осуществляется после снижения коэффициента заполнения до значения 0,5 и включения контакторов К1–К4 без бросков токов двигателей. Время переходного процесса составляет 0,02 с. Далее коэффициент заполнения увеличивается до максимального значения с пропорциональным увеличением токов двигателей.

Предложенная схема более надежна, так как групповые переключатели заменены полупроводниковыми ключевыми приборами и несколькими индивидуальными контакторами,

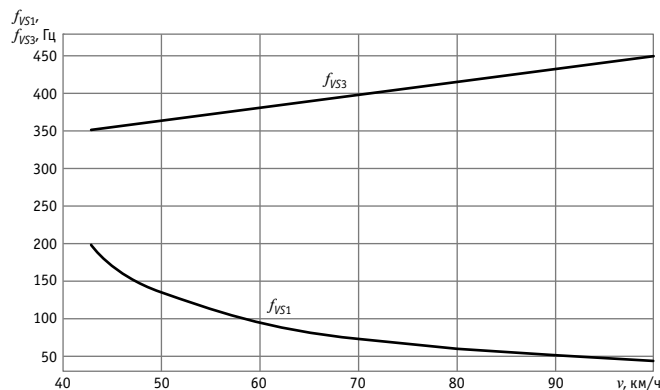


Рис. 8. Частотные характеристики преобразователей VS1 и VS3

отличается плавным пуском и уменьшенными потерями электроэнергии. Для реализации рекуперативного торможения она может быть усовершенствована за счет использования преобразователя, изображенного на рис. 2.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Современная полупроводниковая база и импульсные методы управления преобразователями дали толчок развитию электроподвижного состава на основе бесколлекторных тяговых двигателей [12]. Их энергоэффективность зависит не только от вида и характеристик электрических машин, но и от структуры тяговых преобразователей. Испытания бесколлекторных электроприводов выявили преимущества автономных инверторов

напряжения (АИН) и асинхронных тяговых двигателей (АТД). В отечественных и зарубежных источниках отмечается целесообразность использования АИН, содержащих шесть полностью управляемых ключевых приборов [13, 14]. Поиск технических решений продолжается. Разработан преобразователь для питания асинхронного двигателя опытного экипажа на электромагнитном подвесе (рис. 11), содержащий два управляемых ключевых элемента [15].

Инвертор содержит два импульсных преобразователя ИП1 и ИП2 и переключатель фаз ПФ. Импульсные преобразователи обеспечивают регулирование напряжения на обмотках статора двигателя, переключатель фаз — изменение выходной частоты тока статора. Для улучшения формы напряжения, подводимого к обмоткам статора АТД, схему, изображенную на рис. 11, можно преобразовать в трехточечный АИН, добавив два однооперационных тиристора и два импульс-

ных преобразователя, что позволит в три раза уменьшить число полностью управляемых приборов по сравнению со схемой трехуровневого инвертора с последовательным соединением конденсаторов и диодной блокировкой [13, 16].

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Изменение условий сцепления колесных пар с рельсами, колебания напряжения контактной сети, коммутационные процессы в силовых цепях ЭПС могут быть причинами, нарушающими соотношение

$$F_{\text{сц}} = P_{\text{сц}} \cdot \psi_{\text{к}} > F_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{сц}}$ — сила сцепления в зоне контакта колес с рельсами;

$F_{\text{к}}$ — сила тяги на ободе колеса;

$P_{\text{сц}}$ — вес подвижного состава;

$\psi_{\text{к}}$ — коэффициент сцепления.

Так как факторы, способствующие развитию процесса скольжения, многообразны, а последствия вредны, для уменьшения износа колесных пар и рельсов, снижения вероятности выхода из строя тяговых двигателей необходимо прини-

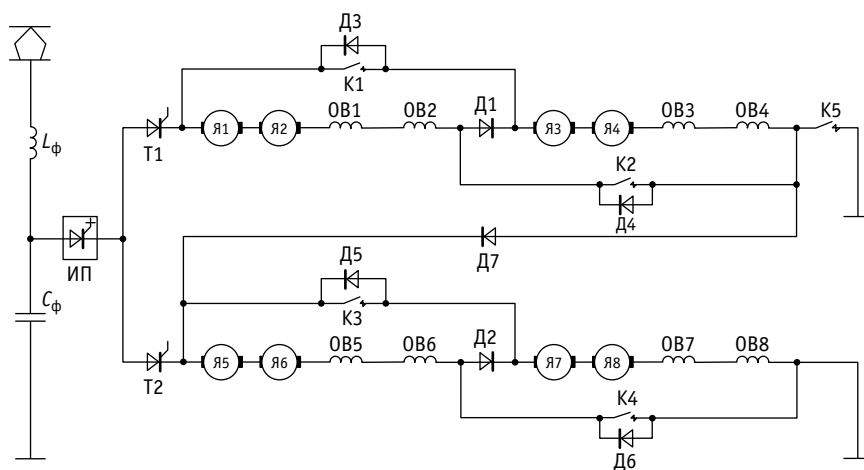


Рис. 9. Принципиальная схема восьмиосного электровоза с импульсным преобразователем

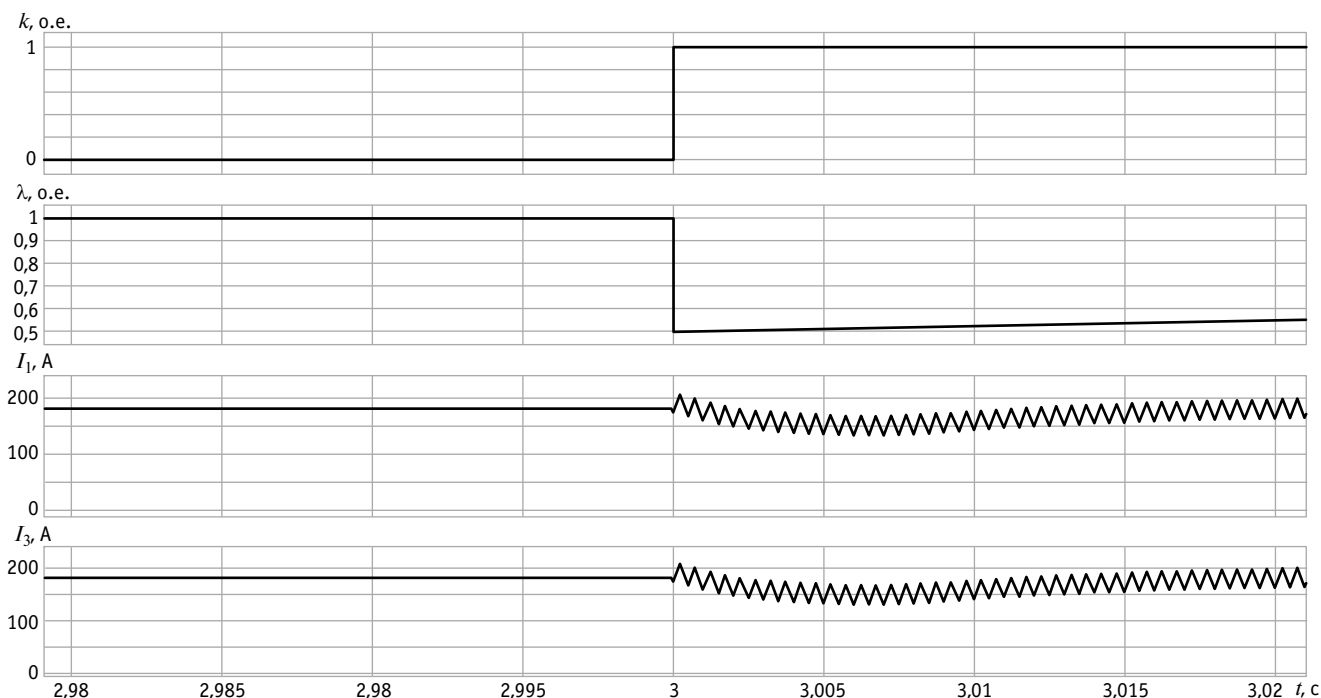


Рис. 10. Результаты моделирования силовой цепи электровоза при переходе на параллельное соединение тяговых двигателей

мать меры, выбор и разработка которых являются актуальной задачей [17]. Ввиду того что учесть все причины, влияющие на коэффициент сцепления, затруднительно, используют экспериментальные данные, полученные на основе измерений силы тока или тяги в режиме перемежающегося боксования, так как непосредственно замерить силу сцепления невозможно.

Снизить негативные последствия боксования можно на основе использования превентивных мер, включающих в себя:

контроль технического состояния ЭПС (параметры развески колесных пар, бандажей, рессорного подвешивания);

применение электропневматических и электромагнитных догрузателей;

использование устройств очистки поверхностей бандажей и рельсов [18].

Своевременное обнаружение и ликвидация развивающегося и тем более установившегося процесса боксования позволит существенно повысить эффективность использования тяговых свойств ЭПС. Подтверждением этого являются результаты исследований, выполненных на кафедре «Электрическая тяга» ЛИИЖТа. За счет изменения нагрузки на колесные пары и возбуждения тяговых двигателей электровоза ВЛ23 удалось существенно увеличить коэффициент сцепления. На рис. 12 изображены кривые коэффициента сцепления, полученные из правил тяговых расчетов (ПТР) по методике ЦНИИ МПС (ныне — ВНИИЖТ) и на опытных электровозе ВЛ23–486 [19].

Импульсные методы управления параметров силовых цепей легли в основу

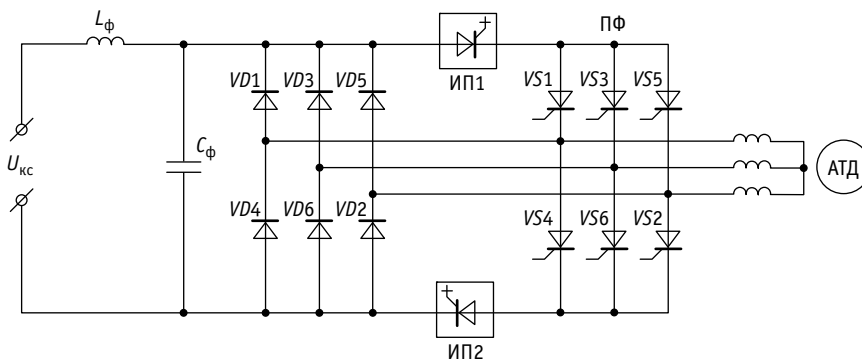


Рис. 11. Схема автономного инвертора с групповой коммутацией

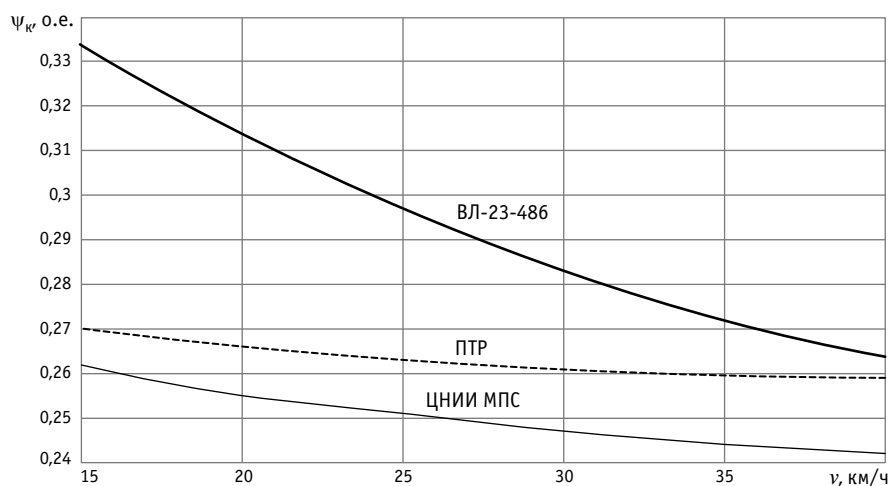


Рис. 12. Кривые коэффициента сцепления $\psi_k(v)$

устройств обнаружения, предупреждения и ликвидации скольжения колесных пар. Основными требованиями к ним являются быстродействие, точность измерения, простота и надежность. Принципов реа-

лизованных и заложенных в них схемных решений достаточно много. Для повышения эффективности средств обнаружения и ликвидации боксования целесообразно объединить эти функции.

Литература

1. Прошутинский Р. И., Колодкин О. В. Вентильные двигатели в тяговом приводе электрического подвижного состава магистральных железных дорог // Известия ПГУПС. 2015. № 1. С. 51–56. ISSN 1815–588X.
2. Магистральные электровозы. Общие характеристики. Механическая часть / В. И. Боcharов, И. Ф. Кадинцев, А. И. Кравченко [и др.]. Москва : Машиностроение, 1991. 224 с.
3. Устройство для регулирования скорости тягового электродвигателя / А. С. Мазнев, А. А. Киселев : патент 2673567 Российская Федерация. № 2018105827/18 ; заявл. 15.02.18 ; опубл. 28.11.18, Бюл. № 34.
4. Мазнев А. С., Киселев А. А. Математическое исследование многорежимного преобразователя постоянного тока // Сборник

References

1. Proshutinskiy R. I., Kolodkin O. V. Self-controlled synchronous motors in traction drive of main-line railway electric rolling stock [Ventil'nye dvigateli v tyagovom privode elektricheskogo podvizhnogo sostava magistral'nykh zheleznnykh dorog] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2015. No. 1. Pp. 51–56. ISSN 1815–588X.
2. Mainline electric locomotives. Common characteristics. Mechanical part [Magistral'nye elektrovozy. Obshhie kharakteristiki. Mekhanicheskaya chast'] / V. I. Bocharov, I. F. Kadintsev, A. I. Kravchenko et al. Moscow : Machinery, 1991. 224 p.
3. Device for regulation of speed of traction electric motor [Ustroystvo dlya regulirovaniya skorosti tyagovogo elektrodvigatelya] / A. S. Maznev, A. A. Kiselev : patent 2673567 Russian Federation. No. 2018105827/18; filed 15.02.18 ; publ. 28.11.18, Bulletin No. 34.
4. Maznev A. S., Kiselev A. A. Mathematical investigation of multimode direct current converter [Matematicheskoe issledovanie mnogorezhimnogo preobrazovatelya postoyannogo toka] // Proceedings of the conference

- трудов конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2019). Ростов-на-Дону, 2019. С. 73–77.
5. Устройство для регулирования скорости тягового электродвигателя / А. С. Мазнев, А. А. Киселев : заявка на изобретение № 2019136709 ; заявл. 14.11.19.
 6. Цукало П. В., Ерошкин Н. Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. Москва : Транспорт, 1986. 359 с.
 7. Сенаторов В. А., Сиротенко Н. С. Рабочие характеристики тяговых двигателей электропоездов ЭД4М // Локомотив. 1999. № 8. ISSN 0869–8147.
 8. Некрасов В. И., Мазнев А. С., Шапошникова Е. П. Исследование импульсной системы рекуперативного торможения // Электротехника. 1969. № 4.
 9. Курбасов А. С. Тяговые возможности электровозов ВЛ10 можно улучшить // Локомотив. 2004. № 5. С. 24–25. ISSN 0869–8147.
 10. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава / А. С. Мазнев, А. А. Киселев : патент на полезную модель 183291 Российская Федерация. № 2018105805/18 ; заявл. 15.02.18 ; опубл. 17.09.18, Бюл. № 26.
 11. Мазнев А. С., Киселев А. А. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока // Известия Транссиба. 2019. № 1. С. 17–27. ISSN 2220–4245.
 12. Тенденции развития тягового электропривода электроподвижного состава железных дорог / А. А. Бакланов, Н. В. Евин, Д. В. Мурзин, А. П. Шиялков // Национальные приоритеты России. 2013. № 3 (10). С. 90–96. ISSN 2221–7711.
 13. Розанов Ю. К., Рябчинский М. В., Кваснюк А. А. Силовая электроника : учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. 632 с.
 14. Bimal K. Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives : Technology and Applications. IEEE Press, 1997. 660 p.
 15. Преобразователь для питания тягового линейного двигателя от сети постоянного тока / А. С. Мазнев, А. Н. Рогов, К. А. Архипов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. 1982. № 3. С. 372–376. ISSN 0136–3360.
 16. Мазнев А. С., Шатнев О. И. Электрические аппараты и цепи подвижного состава : учебное пособие. Москва : Академия, 2008. 272 с.
 17. Бакланов А. А., Мельк В. О., Есин Н. В. Повышение противобоксовочных свойств электровозов переменного тока // Вестник ВЭЛНИИ. 2015. № 1 (69). С. 53–58. ISSN 1816–1928.
 18. Лужнов Ю. М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. Москва : Интекст, 2009. 176 с.
 19. Модернизация силовой схемы электровоза для улучшения противобоксовочных свойств : отчет о НИР / ЛИИЖТ ; рук. Перевозчиков С. Н. Ленинград, 1974. 62 с.
 - «Transport: science, education, manufacturing» (Transport'2019). Rostov-on-Don, 2019. Pp. 73–77.
 5. Device for regulation of speed of traction electric motor [Ustroystvo dlya regulirovaniya skorosti tyagovogo elektrodvigatelya] / A. S. Maznev, A. A. Kiselev : application for invention No. 2019136709 ; filed 14.11.19.
 6. Tsukalo P. V., Eroshkin N. G. Electric trains ER2 i ER2R [Elektropoezda ER2 i ER2R]. Moscow : Transport, 1986. 359 p.
 7. Senatorov V. A., Sirotenko N. S. Operational characteristics of traction motors of ED4M electric multiple units [Rabochie kharakteristiki tyagovykh dvigateley elektropoezdov ED4M] // Locomotive. 1999. No. 8. ISSN 0869–8147.
 8. Nekrasov V. I., Maznev A. S., Shaposhnikova E. P. Investigation of pulse system of regenerative braking [Issledovanie impul'snoy sistemy reku-perativnogo tormozheniya] // Electrical Engineering. 1969. No. 4.
 9. Kurbasov A. S. Traction capabilities of VL10 electric locomotives is possible to improve [Tyagovye vozmozhnosti elektrovozov VL10 mozhno uluchshit'] // Locomotive. 2004. No. 5. Pp. 24–25. ISSN 0869–8147.
 10. Device for regulation of speed of electric rolling stock [Ustroystvo dlya regulirovaniya skorosti tyagovogo elektrodvigatelya] / A. S. Maznev, A. A. Kiselev : patent for utility model 183291 Russian Federation. No. 2018105805/18 ; filed 15.02.18 ; publ. 17.09.18, Bulletin No. 26.
 11. Maznev A. S., Kiselev A. A. Improving of controlling indexes on DC railway stock [Uluchshenie regulirovochnykh svoystv elektricheskogo podvizhnogo sostava postoyannogo toka] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 1. Pp. 17–27. ISSN 2220–4245.
 12. Development tendencies of traction drive of railway electric rolling stock [Tendentsii razvitiya tyagovogo elektroprivoda elektropodvizhnogo sostava zheleznikh dorog] / A. A. Baklanov, N. V. Evin, D. V. Murzin, A. P. Shilyakov // Russian national priorities. 2013. No. 3 (10). Pp. 90–96. ISSN 2221–7711.
 13. Rozanov Yu. K., Ryabchinskiy M. V., Kvasnyuk A. A. Power electronica [Silovaya elektronika] : textbook for universities. Moscow : Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, 2009. 632 p.
 14. Bimal K. Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives : Technology and Applications. IEEE Press, 1997. 660 p.
 15. Converter for feeding linear traction motor from the direct current power network [Preobrazovatel' dlya pitaniya tyagovogo lineynogo dvigatelya ot seti postoyannogo toka] / A. S. Maznev, A. N. Rogov, K. A. Arkhipov et al. // Russian Electromechanics. 1982. No. 3. Pp. 372–376. ISSN 0136–3360.
 16. Maznev A. S., Shatnev O. I. Electric machines and circuits of rolling stock [Elektricheskie apparaty i tsepi podvizhnogo sostava] : textbook. Moscow : Academy, 2008. 272 p.
 17. Baklanov A. A., Mel'k V. O., Esin N. V. Improvement of antiskid characteristics of AC electric locomotives [Povyshenie protivoboksovochnykh svoystv elektrovozov peremennogo toka] // Vestnik VELNII. 2015. No. 1 (69). Pp. 53–58. ISSN 1816–1928.
 18. Luzhnov Yu. M. Nanotribology of adhesion of wheels with rails. Reality and possibilities [Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami. Real'nost' i vozmozhnosti]. Moscow : Intext, 2009. 176 p.
 19. Modernization of power scheme of electric locomotive for improving antiskid properties [Modernizatsiya silovoy skhemy elektrovoza dlya uluchsheniya protivoboksovochnykh svoystv] : report on research work / LIIZhT; executive Perevozchikov S. N. Leningrad, 1974. 62 p.

Объем статьи 1 авторский лист

УДК 621.313

Анна Владимировна Долгова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Павел Константинович Шкодун, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Anna Vladimirovna Dolgova, PhD in Engineering, Associate Professor, Computer Science and Computer Graphics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Pavel Konstantinovich Shkodun, PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

The use of fuzzy logic apparatus in development of expert systems for diagnosing traction electric motors of rolling stock

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос о разработке экспертной системы диагностирования тяговых электродвигателей подвижного состава. С использованием графоаналитических методов выбраны диагностические параметры коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя, представляющие собой входные лингвистические переменные нечеткой модели. Сформированы нечеткая математическая модель и нечеткая нейронная сеть для комплексного показателя качества механической обработки, реализующие алгоритм нечеткого вывода Такаги — Сугено. Подтверждены целесообразность и адекватность ранее предложенного комплексного показателя качества механической обработки для определения технического состояния коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. В результате проведенных исследований создан элемент интеллектуальной экспертной системы диагностирования, которая позволяет комплексно оценить техническое состояние тягового электродвигателя.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, экспертная система диагностирования, нечеткая нейронная сеть, алгоритм Такаги — Сугено, коллекторно-щеточный узел.

Summary

The paper discusses the development of an expert system for diagnosing electric traction motors of rolling stock. The diagnostic parameters of the electric traction motor commutator-and-brush assembly, being the input linguistic variables of the fuzzy model, were selected with the use of graphoanalytic model. A fuzzy mathematical model and a fuzzy neural network for comprehensive indicator of quality of mechanical machining implementing the Takagi — Sugeno fuzzy inference algorithm were developed. The authors confirmed the practicability and the adequacy of the previously proposed comprehensive indicator of quality of mechanical machining for assessing the technical condition of the electric traction motor commutator-and-brush assembly. The studies carried out allowed creating an element of intelligent expert diagnostics system that enables a comprehensive assessment of technical condition of electric traction motor.

Keywords: traction electric motor, expert system of diagnostics, fuzzy neural network, Takagi — Sugeno algorithm, commutator-and-brush assembly.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-65-69

Железнодорожный транспорт России — один из основных видов наземного транспорта, осуществляющий перевозку до 20 % всех грузов [1]. К числу приоритетных направлений развития науки, техники и технологий холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и на перспективу до 2025 г. относится разработка и внедрение инновационных систем диагностики и мониторинга подвижного состава [2]. Тяговый электрический двигатель (ТЭД) является узлом, в значительной мере определяющим безопасность, надежность и энергоэффективность подвижного состава. Он представляет собой сложную техническую систему, достоверное диагностирование которой позволяет выбрать наиболее эффективный комплекс ремонтных мероприятий с учетом минимальных издержек и обеспечить требуемые показатели надежности подвижного состава.

В настоящее время техническое состояние ТЭД в условиях локомотивного депо оценивается в рамках отдельных операций утвержденного технологического процесса. Такой подход не всегда позволяет получать достоверные сведения и в должной мере определять надежность и остаточный ресурс тягового электродвигателя.

На сегодняшний день уже разработаны различные системы диагностирования элементов ТЭД — коллекторно-щеточного узла, магнитной системы, изоляции и др. [3–6]. Однако следует отметить, что они не дают возможности выполнять комплексную оценку технического состояния ТЭД в целом. Таким образом, создание интеллектуальной экспертной системы диагностирования (ЭСД), комплексно оценивающей техническое состояние ТЭД, является актуальной задачей. ЭСД позволит в дальнейшем определять параметры надежности и остаточный ресурс на

основе полученных диагностических данных. В статье рассматривается выбор метода построения системы диагностирования и создание фрагмента интеллектуальной ЭСД технического состояния ТЭД.

Эффективность решения комплексной задачи диагностирования ТЭД зависит от правильности выбора метода построения экспертной системы. Современные системы технического диагностирования ТЭД формируют заключение о состоянии некоторого элемента по значениям набора диагностических признаков. Эти признаки формируются на основе информации о параметрах процессов в ТЭД и о режимах его работы. Таким образом, для создания ЭСД необходимо установить наборы диагностических параметров для каждого узла тягового электродвигателя.

В настоящее время интеллектуальные ЭСД разрабатывают с использованием методов математического анализа и моделирования.

Техническое состояние диагностируемого объекта на предприятиях (в том числе на железнодорожных) описывают качественными, а не количественными характеристиками. Для описания объекта используют понятия «исправное состояние», «работоспособное состояние», «неработоспособное состояние», «предельное состояние».

Подобный подход к анализу технического состояния объекта позволяет использовать нейронные нечеткие сети (ННС) для формирования ЭСД. Особенности ННС — способность к обработке нечетких функций принадлежности и правил базы знаний нечеткой нейронной модели, возможность определять знания из выборки исходных данных с применением нейронных способов обучения.

Рассмотрим создание фрагмента интеллектуальной ЭСД на примере коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. Определение необходимого набора диагностических параметров выполнено на основе уточненной граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя при проведении приемно-сдаточных испытаний. Параметры модели — компоненты нелинейного дифференциального уравнения, описывающего процесс коммутации в тяговом электродвигателе [7]. Для выбора эффективного набора диагностических параметров проведена декомпозиция граф-модели и построены двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров. Из полученного эффективного множества диагностических параметров выделена группа параметров, позволяющих оценить качество механической обработки и сборки ТЭД $\{A_1, A_2, \sigma_h\}$: среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных пластин σ_h (5–25 мкм), амплитуда первой A_1 (3–35 мкм) и второй A_2 (0–20 мкм) гармонических составляющих профиля коллектора. Для представленной группы диагностических параметров составлена нечеткая модель и сформирована нейронная сеть.

В теории нечеткой логики наиболее распространены два метода нечеткого вывода: Мамдани и Такаги — Сугено [8]. Реализация представленной нечеткой модели выполнена на основе метода нечеткого вывода Такаги — Сугено, поскольку он обеспечивает высокую точность идентификации нелинейных зависимостей [9]. Нейронная сеть сформирована в редакто-

ре ANFIS (система компьютерной математики MATLAB), позволяющем создать адаптивную сеть нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги — Сугено.

Откликом системы нечеткого вывода принят комплексный показатель качества механической обработки (КПКМО) — одна из составляющих комплексного показателя качества ремонта, предложенного авторами в [10].

Для реализации алгоритма Такаги — Сугено выделены следующие лингвистические переменные: *амплитуда первой гармонической составляющей профиля коллектора*, *амплитуда второй гармонической составляющей профиля коллектора*, *среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных пластин*, КПКМО. Для каждой лингвистической переменной составлены терм-множества и сформированы функции принадлежности. Для входных переменных в качестве функций принадлежности выбраны функции Гаусса (рис. 1), для выходной переменной — константы: качественная механическая обработка $\mu_A(\text{КПКМО}) = 1$; некачественная механическая обработка $\mu_A(\text{КПКМО}) = 0,7$; более или менее качественная механическая обработка $\mu_A(\text{КПКМО}) = 0,1$.

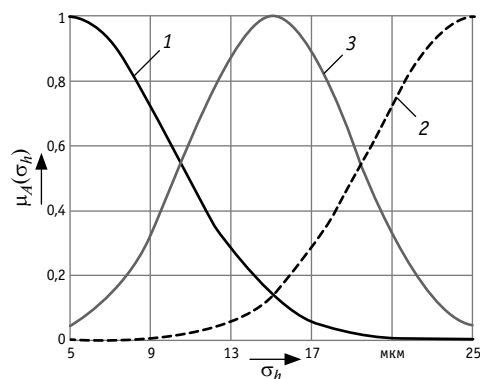


Рис. 1. Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термы:
1 — нормальное значение σ_h ; 2 — большое значение σ_h ;
3 — не нормальное и не большое значение σ_h

В рамках реализации алгоритма нечеткого вывода Такаги — Сугено для рассматриваемой системы сформулированы правила нечеткой продукции (рис. 2).

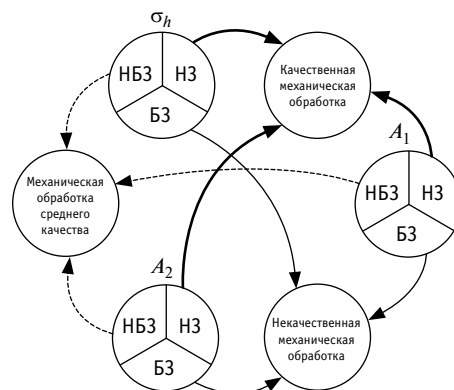


Рис. 2. Графическая интерпретация базы правил нечеткой модели

Правило 1. Если σ_h имеет нормальное значение (НЗ), и A_1 имеет нормальное значение, и A_2 имеет нормальное значение, то механическая обработка качественная.

Правило 2. Если σ_h имеет не нормальное и не большое значение (НБЗ), и A_1 имеет не нормальное и не большое значение, и A_2 имеет не нормальное и не большое значение, то механическая обработка среднего качества.

Правило 3. Если σ_h имеет большое значение (БЗ), и A_1 имеет большое значение, и A_2 имеет большое значение, то механическая обработка некачественная.

В рассматриваемой модели логическая операция «и» реализована методом минимума, «или» — методом максимума, в качестве метода дефазификации выбрано взвешенное среднее.

Анализ деятельности алгоритма нечеткого вывода выполняется по гиперповерхностям результирующей лингвистической переменной, при этом пространство для построения поверхности отклика является многомерным. Гиперповерхность лингвистической переменной КПКМО в пространстве признаков КПКМО = $f(A_1, \sigma_h)$ приведена на рис. 3.

Нейронная нечеткая сеть, реализующая элемент экспертной системы диагностирования по алгоритму Такаги — Сугено, сформирована в редакторе ANFIS (система компьютерной математики MATLAB) на основе составленной нечеткой модели [11, 12].

Для формирования обучающих выборок ННС проведены исследования ТЭД ТЛ-2К1 в локомотивном депо, в результате получены профилограммы коллекторов ТЭД (с помощью прибора ПКП-4М) на различных стадиях ремонта: до ремонта, после депоовского ремонта в объеме ТР-3, после проведения приемо-сдаточных испытаний. Программная обработка профилограмм позволила определить численные значения входных лингвистических переменных разработанной нечеткой модели. Для всех значений диагностических параметров с помощью сформированной нечеткой модели рассчитано значение выходной лингвистической переменной КПКМО, результат дефазификации которой для диагностических параметров ТЭД до проведения ремонта представлен на рис. 4.

В качестве обучающей выборки для разработанной ННС приняты значения диагностических параметров и переменной КПКМО для ТЭД до ремонта, тестовой выборки — для ТЭД

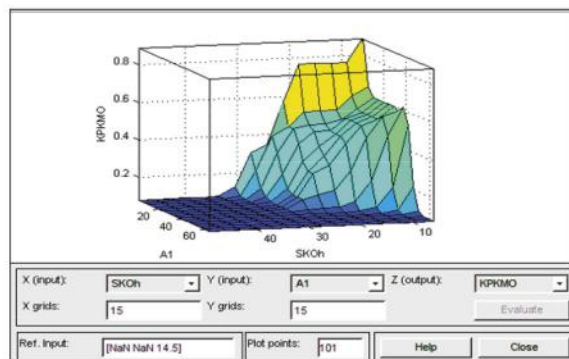


Рис. 3. Представление многомерной поверхности КПКМО в пространстве признаков A_1 и σ_h

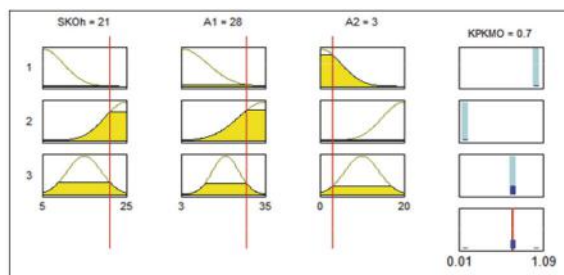


Рис. 4. Результаты дефазификации лингвистической переменной КПКМО для одного из ТЭД

после ремонта, контрольной выборки — для ТЭД после проведения приемо-сдаточных испытаний. Объем обучающей выборки составил 38, тестовой — 22, контрольной — 14 значений. При обучении ННС использован гибридный алгоритм обучения сети, сочетающий методы обратного распространения ошибки и наименьших квадратов. Точность обучения ННС задана на уровне 0,05, количество итераций обучения принято равным объему обучающей выборки — 38.

Результаты тестирования ННС приведены на рис. 5 и 6. Средняя ошибка обучения ННС на контрольной выборке составила 0,12, что свидетельствует об адекватности модели, лежащей в основе ННС.

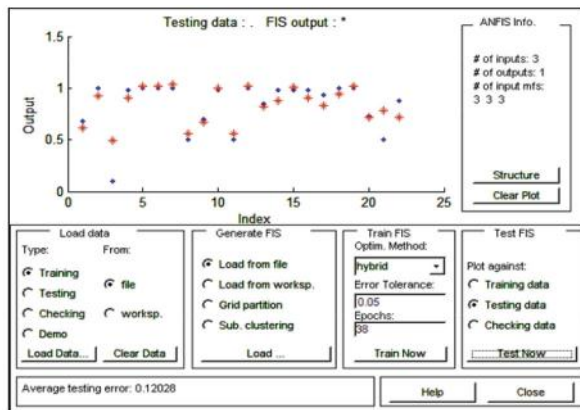


Рис. 5. Результаты тестирования ННС на тестовой выборке

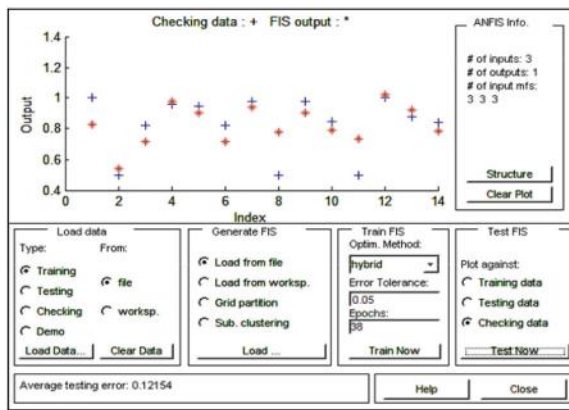


Рис. 6. Результаты тестирования ННС на контрольной выборке

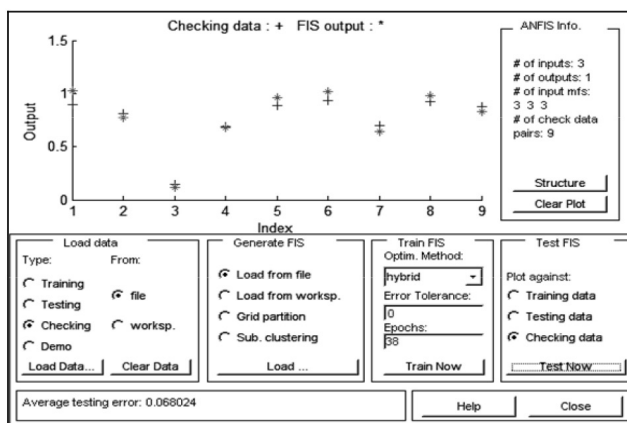


Рис. 7. Результаты работы ННС на контрольной выборке 1

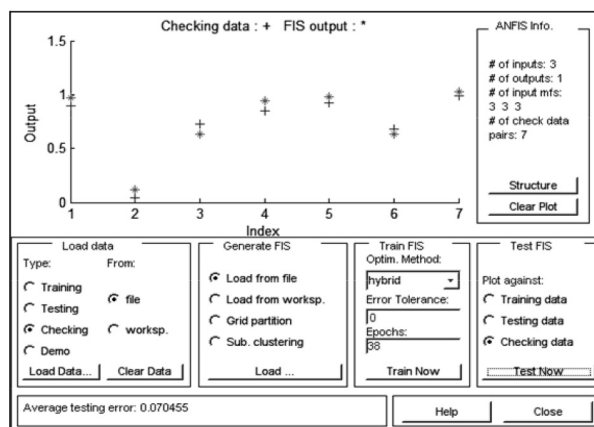


Рис. 8. Результаты работы ННС на контрольной выборке 2

Для подтверждения адекватности разработанной нечеткой модели и ННС по результатам испытаний ТЭД ЭК810Ч и ЭДП810У из рассчитанных значений диагностических параметров сформированы две контрольные выборки: первая — для ТЭД после ремонта, вторая — после проведения приемо-сдаточных испытаний. Средняя ошибка работы ННС на контрольных выборках не превысила 0,08, что свидетельствует об адекватности модели, лежащей в основе ННС (рис. 7 и 8).

В результате проведенных исследований с применением аппарата нечеткой логики сформирована нечеткая математическая модель комплексного показателя КПКМО, реализу-

ющая алгоритм нечеткого вывода Такаги — Сугено. Описано создание ННС на базе сформированной математической модели и показано использование обучающей, тестовой и контрольной выборок для обучения сети.

На основе выполненных исследований создан элемент интеллектуальной экспертной системы диагностирования, которая позволяет комплексно оценить техническое состояние ТЭД. Подтверждена целесообразность и адекватность ранее предложенного комплексного показателя КПКМО, который может быть применен для качественной и количественной оценки технического состояния ТЭД.

Литература

1. Транспорт в России. 2018 : статистический сборник. Москва : Росстат, 2018. 101 с.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». Москва : ОАО «РЖД», 2015. 63 с. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 09.01.2020).
3. Основные элементы диагностической системы контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электрических машин постоянного тока / В. Д. Авилов, Р. В. Сергеев, В. В. Харламов [и др.] // Исследование процессов взаимодействия объектов железнодорожного транспорта с окружающей средой : сборник статей по результатам выполнения программы фундаментальных и поисковых научно-исследовательских работ за 2001 год. Омск : ОмГУПС, 2001. С. 64–76.
4. Тычков А. С. Диагностирование тяговых электродвигателей грузовых электровазозов по параметрам магнитного поля : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара : СамГУПС, 2009. 144 с.
5. Харламов В. В., Шестаков И. В., Шкодун П. К. Автоматизированная система комплексной диагностики состояния изоляции тяговых электродвигателей // Известия Транссиба. 2015. № 4 (24). С. 62–68. ISSN 2220–4245.
6. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Гадеев А. И. Современные методы диагностики электрохимических систем // Вестник Астра-

References

1. Transport in Russia. 2018 [Transport v Rossii. 2018] : statistical digest. Moscow : Rosstat, 2018. 101 p.
2. The strategy of scientific and technological development of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the long term until 2025. «The White Book» [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskie zheleznnye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda. «Belaya kniga»]. Moscow : JSC Russian Railways, 2015. 63 p. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (access date: 09.01.2020).
3. Main elements of diagnostic system for controlling technical condition of coomutator-and-brush assembly of DC traction electric machines [Osnovnye elementy diagnosticheskoy sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shhetochnogo uzla tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo toka] / V. D. Avilov, R. V. Sergeev, V. V. Kharlamov et al. // Investigation of processes of railway transport objects interaction with environment : proceedings of the Program of fundamental and searching research works for 2001. Omsk : OSTU, 2001. Pp. 64–76.
4. Tychkov A. S. Diagnostics of traction electric motors of freight electric locomotives by parameters of magnet field [Diagnostirovanie tyagovykh elektrodvigatelay gruzovykh elektrovovozov po parametram magnitnogo polya] : PhD in Engineering Thesis. Samara : SSTU, 2009. 144 p.
5. Kharlamov V. V., Shestakov I. V., Shkodun P. K. Automated full-service system for traction machines insulation diagnostics [Avtomatizirovannaya sistema kompleksnoy diagnostiki sostoyaniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelay] // Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 4 (24). Pp. 62–68. ISSN 2220–4245.
6. Vakhromeev O. S., Karimov R. T., Gadeev A. I. Modern diagnostic methods for electromechanical systems [Sovremennyye metody diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem] // Vestnik of Astrakhan State Technical University. 2006. No. 2 (31). Pp. 51–56. ISSN 2073–5537.

- ханского государственного технического университета. 2006. № 2 (31). С. 51–56. ISSN 2073–5537.
7. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. С. Хлопцов, А. В. Долгова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 1. С. 88–95. ISSN 2500–1019.
 8. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 09.01.2020).
 9. Матковская М. О. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в моделях принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 3 (92). С. 240–243. ISSN 1999–9429.
 10. Шкодун П. К., Долгова А. В. Применение аппарата нечеткой логики при диагностировании коллекторно-щеточного узла тяговых электрических двигателей подвижного состава // Известия Транссиба. 2016. № 4 (28). С. 59–69. ISSN 2220–4245.
 11. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
 12. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва : Горячая линия — Телеком, 2007. 288 с.
 7. Creating a graph model for the diagnosis of the traction motor commutator-brush unit considering thermal factors [Formirovanie graf-modeli diagnostirovaniya kollektorno-shhetochного узла tyagovого elektrodvigatelya s uchetom teplovykh faktorov] / V. V. Kharlamov, P. K. Shkodun, A. S. Khloptsov, A. V. Dolgova // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2016. Vol. 327. No. 1. Pp. 88–95. ISSN 2500–1019.
 8. Shtovba S. D. Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic [Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (access date: 09.01.2020).
 9. Matkovskaya M. O. Research of algorithms of the fuzzy conclusion in decision-making models [Issledovanie algoritmov nechetkogo vyvoda v modelyakh prinyatiya resheniy] // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2009. No. 3 (92). Pp. 240–243. ISSN 1999–9429.
 10. Shkodun P. K., Dolgova A. V. Automated full-service system for traction machines insulation diagnostics [Primenenie apparata nechetkoy logiki pri diagnostirovani kollektorno-shhetochного узла tyagovykh elektricheskikh dvigateley podvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2016. No. 4 (28). Pp. 59–69. ISSN 2220–4245.
 11. Leonenkov A. V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH [Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH]. St. Petersburg : BKhV-Petersburg, 2005. 736 p.
 12. Shtovba S. D. Designing fuzzy systems using MATLAB [Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB]. Moscow : Hot Line — Telecom, 2007. 288 p.

Объем статьи 0,58 авторских листа

УДК 629.423.1

Владимир Васильевич Бублик, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Олег Владимирович Гателюк, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Николай Васильевич Есин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Виктор Александрович Смирнов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Олег Дмитриевич Юрасов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Vladimir Vasilyevich Bublik, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Oleg Vladimirovich Gateluyuk, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Higher Mathematics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Nikolay Vasilyevich Esin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Viktor Alexandrovich Smirnov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Oleg Dmitrievich Yurasov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Condition analysis of existing technological process for repair of electric traction motors of direct current freight locomotives with the use of theory of network planning and control

Аннотация

В статье приведена информация об опыте использования сетевых графиков, способствующих соблюдению логической дисциплины при планировании, составлении календарных планов и управлении ремонтными работами по восстановлению тяговых электродвигателей (ТЭД) грузовых электровозов серии 2ЭС6 в условиях сервисных локомотивных депо (СЛД), а также предложен комплекс мер по оптимизации технологического процесса ремонта ТЭД в объеме ТР-600. Анализ существующего технологического процесса ремонта ТЭД позволил определить особенности распределения времени каждой операции в ветвях сетевого графика, выявить временные параметры объема ремонта отдельных узлов и обосновать резервы, позволяющие сократить время проведения плановых ремонтов ТЭД электровоза в объеме ТР-600. Полученные результаты могут быть использованы в СЛД при обосновании мероприятий по оптимизации технологического процесса ремонта ТЭД с целью сокращения временных затрат и экономических издержек при ремонте электровозов серии 2ЭС6.

Ключевые слова: электровоз, тяговый электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, магнитная система, технологический процесс ремонта, сетевой график, критический путь, среднее распределение времени, дисперсия.

Summary

The paper provides information about the experience of using network schedules in the conditions of service locomotive depots that contribute to the observance of logical discipline in planning, drawing up calendar plans and managing repair work to restore traction engines of 2ES6 series of freight electric locomotives, as well as a set of measures to optimize the technological process of traction engines repair in the volume of TR-600. The analysis of the existing technological process of repair of traction engines allowed to reveal features of distribution of time of each operation in branches of the network schedule with identification of time parameters of volumes of repair of its separate nodes, and also to justify reserves allowing to accelerate carrying out planned repairs of traction engines in volume of TR-600 of the electric locomotive. The results obtained can be used in service locomotive depots when justifying measures to optimize the technological process of repair of electric locomotives in order to reduce the time and economic costs of repairing electric locomotives 2ES6.

Keywords: electric locomotive, traction motor, collector-brush assembly, magnetic system, repair process, network diagram, critical path, average time distribution, dispersion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-70-74

Ремонт и сервисное обслуживание тягового электроподвижного состава призваны помогать эксплуатационникам доставлять грузы и пассажиров без сбоев графика и обеспечивать безопасность движения поездов [1]. Длительная эксплуатация приводит к различным поломкам (отказам) электромеханического оборудования электровозов и другого тягового подвижного состава, поэтому их скорейшее восстановление — основная задача сервисных локомотивных депо (СЛД) и ремонтных заводов [1]. Работоспособность электровоза определяется работоспособностью его составных узлов, важнейшим из которых следует считать тяговый электродвигатель (ТЭД). От правильного функционирования узлов и деталей электровоза, особенно его ТЭД, зависят многие качественные и количественные показатели работы железной дороги в целом и длительность жизненного цикла тягового электроподвижного состава в частности [2]. Следовательно, мероприятия по повышению качества ремонта подвижного состава актуальны для железнодорожного транспорта.

В статье на основе выполненных исследований дан анализ существующего технологического процесса ремонта ТЭД электровозов постоянного тока серии 2ЭС6, а также организации технологических процессов восстановления работоспособности узлов и деталей электровозов с учетом множества факторов, влияющих на длительность этих процессов.

Поскольку задача оптимизации решается для конкретных эксплуатационных условий, все значения показателей, входящих в критерий оптимальности, следует оценивать с учетом этих условий. Наибольшей эффективности эксплуатации локомотивов можно достичь, если при определении видов их ремонта в качестве критерия оптимальности использовать отношение суммарных расходов на ремонты в течение некоторого конкретного периода времени к объему выполненной за тот же этап работы, измеряемой в тонно-километрах брутто.

Поэтому для технологического процесса ремонта тягового подвижного состава в качестве такого критерия принято отношение суммарных расходов на плановые и неплановые виды ремонта к вели-

чине суммарного годового линейного пробега (наработки) локомотивного парка.

В качестве методов исследования использованы статистические и аналитические методы, в частности:

выполнен анализ статистических данных по техническому обслуживанию и ремонту в СЛД Московка Западно-Сибирской железной дороги;

использована технология сетевого планирования и управления для определения оптимального режима работы электромашиностроительного цеха и его отделений СЛД Московка [1];

получены расчетные данные, которые позволили оптимизировать затраты суммарного времени на ремонт ТЭД за счет снижения резерва времени на проведение операций ремонта отдельных узлов.

Для решения поставленных задач выполнено математическое описание тех-

нологического процесса ремонта ТЭД ЭК-810С в объеме ТР-600 в виде сетевой модели [3]. С ее помощью выявлена последовательность работ по ремонту ТЭД, которая дает возможность определить общее время технологического процесса ремонта (критический путь) и резервы времени работ (элементов рассматриваемого технологического процесса), не лежащих на критическом пути. Это позволяет рационально перераспределять трудовые, материальные и финансовые ресурсы для сокращения времени выполнения определенных операций по ремонту ТЭД.

Математическое моделирование осуществлялось по общепринятым методикам, в частности по методике, изложенной в [4], в соответствии с которой использовались параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сетевой модели в соответствии с методикой [4]

Обозначение	Определяемая величина	Расчетная формула
$t_p(i)$	Ранний срок окончания i -й технологической операции	$t_p(i) = \max_{L_{ni}} t(L_{ni})$
$t_n(i)$	Поздний срок окончания i -й технологической операции	$t_n(i) = t_{kp} - \max_{L_{ni}} t(L_{ni})$
$R(i)$	Резерв времени i -й технологической операции	$R(i) = t_n(i) - t_p(i)$
$t_{p,n}(i, j)$	Ранний срок начала (i, j) -го технологического процесса	$t_{p,n} = t_{p,n}(i, j) = t_p(i)$
$t_{p,o}(i, j)$	Ранний срок окончания (i, j) -го технологического процесса	$t_{p,o}(i, j) = t_p(i) + t(i, j)$
$t_{n,n}(i, j)$	Поздний срок начала (i, j) -го технологического процесса	$t_{n,n}(i, j) = t_{p,o}(i) - t(i, j)$
$t_{n,o}(i, j)$	Поздний срок окончания (i, j) -го технологического процесса	$t_{n,o}(i, j) = t_n(j)$
$R_n(i, j)$	Полный резерв времени (i, j) -го технологического процесса	$R_n(i, j) = t_n(j) - t_p(i) - t(i, j)$
$t(L(ij))$	Продолжительность пути	$t(L(k, l)) = \max_{L_s(k, l)} L_s(k, l)$, где максимум берется по всем путям, соединяющим события k и l
t_{kp}	Продолжительность критического пути	$t_{kp} = \max_{L_s(0, z)} L_s(0, z)$, где максимум берется по всем путям, соединяющим начальное и конечное события
$R(L)$	Резерв времени пути	$R(L) = t_{kp} - t(L)$

Таблица 2

Операции по ремонту тягового электродвигателя ЭК-810Ч на критическом пути (фрагмент)

№ п/п	Наименование работ	Минимальное время выполнения операции $t_{\text{опт}}$, мин	Вероятное время выполнения операции $t_{\text{нв}}$, мин	Максимальное время выполнения операции $t_{\text{песс}}$, мин
1	Разборка колесно-моторного блока	52,2	54,0	55,2
2	Мойка и очистка ТЭД	122,0	141,0	155,0
<i>Разборка тягового электродвигателя</i>				
3	Крышки коллекторных люков отсоединить, снять, замерить	1,48	1,60	1,70

14	Якорь из остова вынуть	2,12	2,16	2,30

16	Подшипники из щитов выпрессовать	14,9	15,2	16,2
<i>Ремонт остова</i>				
17	Остов очистить, продуть, протереть	25,4	26,3	28,0
18	Компаундную массу с полюсных болтов удалить	11,7	11,9	12,7
19	Посадочные поверхности остова очистить	35,7	35,7	38,0

37	Проверить состояние подшипниковых щитов с подбором деталей и учетом их комплектности	10,70	11,30	12,00
38	Произвести окраску крышек подшипниковых щитов	5,81	6,13	6,52
39	Залить полюсные болты компаундной массой	5,14	5,35	5,71
<i>Ремонт траверсы в сборе</i>				
40	Перед ремонтом траверсу продуть сжатым воздухом	2,75	3,00	3,21
41	Высоту установки кронштейнов щеткодержателей на траверсе до разборки замерить	5,17	5,45	5,80
42	Шунты отсоединить, щетки из щеткодержателей вынуть	4,50	4,7	5,00

61	Шунты щеток к щеткодержателям подсоединить, закрепить	11,7	12,4	13,2
62	Зазоры между щеткодержателями и коллектором отрегулировать, щетки в гнезда установить, притереть	28,7	30,3	32,2
63	Траверсу продуть	2,89	3,2	3,40
<i>Ремонт якоря</i>				
64	Якорь продуть, вентиляционные отверстия прочистить	7,13	7,99	8,50
65	Якорь осмотреть, крепление деталей проверить	10,5	108	11,5
66	Вал, нажимные шайбы осмотреть, к дефектоскопии подготовить, конусную часть замерить	12,9	13,6	14,5

72	Межламельные промежутки коллектора обработать фасочником, очистить воздушной струей под давлением	63,30	67,00	71,30
73	Снять фаски с обеих сторон коллекторных пластин под углом в 45°	71,10	74,30	79,00
74	Осуществить разделку торцов коллекторных пластин	67,10	70,80	75,30
75	Промежутки между коллекторными пластинами очистить от фрагментов изоляционного материала	55,40	58,30	62,00

<i>Сборка тягового электродвигателя</i>				
77	Кольца подшипников с вала якоря спрессовать	6,70	7,05	7,50
78	Подшипники подобрать, в щиты запрессовать, смазку заложить	17,5	18,6	19,8
79	Крышки подшипниковые внутренние поставить, закрепить	11,4	12,0	12,8

97	Соппротивление изоляции электродвигателя проверить	0,87	0,94	1,00
98	Крышки коллекторных люков поставить, закрепить	2,10	2,26	2,40
99	Испытательная станция (приемо-сдаточные испытания)	216,0	224,0	245,0

Численные значения параметров для сетевой модели (графика) рассчитаны по формулам, также приведенным в табл. 1.

В комплекс работ по ремонту ТЭД электровоза заложены интервалы времени для мойки (очистки), отделения колесной пары от ТЭД, перемещения этих двух узлов для дефектоскопии и контрольных проверок на целостность. Это так называемые эталонные временные интервалы, которые не приводят к увеличению срока окончания ремонта. Критические виды ремонта деталей и узлов не имеют резерва времени, поскольку любая задержка — это увеличение временного интервала на завершающем этапе ремонта всего ТЭД. Поэтому определение раннего срока наступления завершающего события сетевой модели (окончания ремонта) позволяет вычислить длину критического пути, а выявление события с нулевыми резервами времени — определить последовательность критических событий и работ.

Что касается определения временных параметров, характеризующих начало (и окончание) в любые сроки, то можно заметить, что ранний период времени начала технологического процесса ремонта какой-либо детали совпадает с ранним сроком наступления ремонта предыдущей детали, что также рассчитано по приведенным математическим выражениям (см. табл. 1) [4].

Необходимо отметить, что ремонт всех деталей и сборочных узлов ведется на основании Правил ЦТ/ЦТБР-4782, регламентирующих порядок и сроки выполнения ремонта таких важнейших узлов электроподвижного состава, как ТЭД. Отсюда и определяются допуски по временным интервалам технологического процесса ремонта и ТЭД, и всего электровоза в целом.

Таким образом, в рамках сетевой модели (графика) моменты начала и окончания технологической операции тесно связаны с соседними, которые рассчитываются по приведенным в табл. 1 формулам. Этим определяется математическое выражение для резерва времени расчетного пути L сетевой модели, причем необходимо отметить, что такие резервы имеют все не критические пути. Соответственно резерв времени технологического процесса L вычисляется как разность

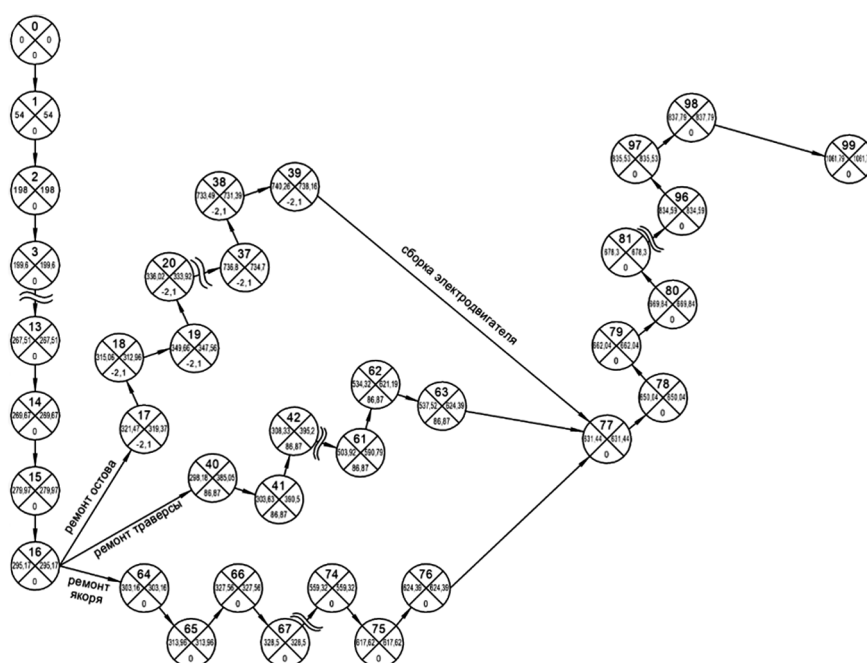


Рис. 1. Фрагмент сетевого графика существующего технологического процесса ремонта ТЭД ЭК-8104

между длиной критического времени технологического процесса и рассматриваемого его фрагмента по выражению, приведенному в табл. 1 [4].

Найденная величина $R(L)$ показывает, насколько реально может быть увеличена продолжительность выполнения всех работ технологического цикла без увеличения общего времени ремонта ТЭД. Любая из работ L на участке, не совпадающем с критическим, имеет резерв времени, а полный резерв времени $R_{\Pi}(i, j)$ работы (i, j) указывает на то, каким образом и за счет чего можно увеличить время ее выполнения при условии, что объем технологических операций по ремонту ТЭД будет своевременно завершен. Полный резерв времени выполнения комплекса технологических операций по ремонту тягового электродвигателя описывается математическим выражением, приведенным в табл. 1.

Для создания сетевого графика был составлен перечень работ по ремонту ТЭД ЭК-8104 грузового магистрального электровоза 2ЭС6 в объеме ТР-600, найдены операции, определяющие весь технологический процесс, рассчитано необходимое время выполнения этих операций с учетом выделенных ресурсов. Взаимосвязи и зависимости между операциями



Рис. 2. Разметка секторов вершин сетевого графика:

i — номер операции; R_i — резерв времени i -й операции; t_p и $t_п$ — ранний и поздний срок окончания работы

ямы записаны в виде таблицы. Поскольку таблица достаточно громоздкая, в статье представлен ее небольшой фрагмент (табл. 2). По данным таблицы построен сетевой график существующей системы ремонта ТЭД (рис. 1).

В сетевом графике, представленном на рис. 1, каждая вершина разделена на четыре сектора [5] (рис. 2).

В результате анализа сетевого графика существующего технологического процесса ремонта ТЭД ЭК-8104 было определено, что общее время ремонта $t_{кр} = 18,25$ ч. Расчеты показали, что критическим является путь, связанный с ремонтом якоря. Остальные пути имеют резервы времени: $R(L_0) = 0,52$ ч — для ремонта остова и $R(L_1) = 2$ ч — для ремонта траверсы. Полный резерв времени для операций по ремонту остова составляет $R_0(i, j) = 0,52$ ч, по ремонту траверсы $R_1(i, j) = 2$ ч. Эти виды ремонта

выполняют разные работники депо. Согласно анализу сетевого графика, резервы времени на ремонт остова, особенно траверсы, достаточно велики, следовательно, необходимо сократить время выполнения операций на критическом пути (ремонт якоря) и по возможности подключить работника, занимающегося ремонтом траверсы, к ремонту остова, магнитной системы и якоря.

Также был сделан анализ работы Омского железнодорожного узла, показавший, что в настоящее время потребность в отремонтированных ТЭД составляет 150 единиц в месяц, однако электромашинный цех СЛД Московка способен выпускать в эксплуатацию всего лишь 90 двигателей. Согласно расчетам, в реальном времени в депо заняты только три ремонтные позиции, и этого недостаточно, чтобы отремонтировать требуемое количество ТЭД. Поскольку СЛД Московка сейчас не имеет возможности увеличить штат электромехаников, сетевой график показывает, где можно найти резервы времени, кото-

рые позволят сократить продолжительность процесса ремонта каждого ТЭД.

В заключение отметим, что проведенные исследования технологического процесса ремонта ТЭД ЭК-810Ч электроваза ЭЭС6 позволили:

- определить общее время ремонта ТЭД;
- установить причины, которые мешают электромашинному цеху СЛД Московка выполнить требуемые объемы ремонта ТЭД;
- выявить резервы, способствующие сокращению продолжительности проведения плановых ремонтов ТЭД в объеме ТР-600 и экономии не только временных расходов на ремонт одного двигателя, но и финансовых расходов на заработную плату работников электромашинного цеха.

В целом методика, использованная в исследованиях, позволит более полно и достоверно оценить показатели ресурса жизненно важных узлов (в частности, коллекторно-щеточного) и подтвердить назначенный срок службы тягового электродвигателя.

Литература

1. Панов К. В. Разработка имитационной модели депоовского ремонта локомотивов, учитывающей вероятность возникновения неплановых технологических операций // Известия Транссиба. 2018. № 4 (36). С. 21–30. ISSN 2220–4245.
2. Исмаилов Ш. К. Технология диагностирования, испытания и ремонта тяговых и вспомогательных электрических машин // Труды XXXII Уральского семинара «Механика и процессы управления» / УрО РАН. Екатеринбург, 2002. С. 429–436.
3. Математическая модель ремонта тяговых электрических машин тягового подвижного состава / Ш. К. Исмаилов, О. В. Гателюк, Е. И. Селиванов, В. В. Бублик // Вестник РГУПС. 2011. № 1 (41). С. 58–62. ISSN 0201–727X.
4. Таирова Е. В. Методы сетевого планирования в организации комплексов работ : учебное пособие. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2007. 95 с.
5. Просветов Г. И. Дискретная математика. Задачи и решения : учебное пособие. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2000. 222 с.

References

1. Panov K. V. Development of the imitation model of depovian repair of locomotives taking into account the probability of the appearance of additional technological operations [Razrabotka imitatsionnoy modeli depovskogo remonta lokomotivov, uchityvayushhey veroyatnost' vozniknoveniya neplanovykh tekhnologicheskikh operatsiy] // Journal of Transsib Railway Studies. 2018. No. 4 (36). Pp. 21–30. ISSN 2220–4245.
2. Ismailov Sh. K. Technology of diagnosing, testing and repair of traction and auxiliary electric machines [Tekhnologiya diagnostirovaniya, ispytaniya i remonta tyagovykh i vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin] // Proceedings of the XXXII Ural workshop «Mechanics and control processes» / UB RAS. Ekaterinburg, 2002. Pp. 429–436.
3. Mathematical model of repair traction electric machines of traction rolling stock [Matematicheskaya model' remonta tyagovykh elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava] / Sh. K. Ismailov, O. V. Gatelyuk, E. I. Selivanov, V. V. Bublik // Vestnik RGUPS. 2011. No. 1 (41). Pp. 58–62. ISSN 0201–727X.
4. Tairova E. V. Methods of network planning in organization of work ranges [Metody setevogo planirovaniya v organizatsii kompleksov rabot] : textbook. Irkutsk : Publishing House of ISTU, 2007. 95 p.
5. Prosvetov G. I. Discrete mathematics. Tasks and solutions [Diskretnaya matematika. Zadachi i resheniya] : textbook. Moscow : Binom. Knowledge laboratory, 2000. 222 p.

Объем статьи 0,43 авторских листа

УДК 621.331

Дмитрий Валентинович Лесников, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С УЧЕТОМ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ

Dmitriy Valentinovich Lesnikov, Associate Professor, Transport Power Supply Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Modeling of direct current traction power system with the consideration for earth conductivity

Аннотация

Сегодня одна из основных задач, стоящих перед компанией ОАО «РЖД», — повышение объема перевозимых грузов. Решение этой задачи непосредственно связано с увеличением нагрузки на устройства тягового электроснабжения и их усилением, что в первую очередь относится к электрическим железным дорогам постоянного тока, для которых характерны большие тяговые токи.

Чтобы оценить возможности усиления участка железной дороги и выявить узкие места в системе тягового электроснабжения, необходимо создание математической модели тяговой сети, учитывающей параметры конкретного участка. В том числе к таким параметрам относятся и проводимость земли, от чего зависят величины переходного сопротивления и потенциала рельсовой сети, а также величина блуждающих токов.

В статье предложена математическая модель тяговой сети постоянного тока, представляющая собой совокупность модели контактной и рельсовой сети. Модель учитывает параметры тяговых подстанций, схему соединения контактных подвесок и возможное влияние рельсов смежных путей друг на друга.

Ключевые слова: модель тяговой сети, двухпутный участок, контактная сеть, рельсовая сеть, потенциал, граничные условия.

Summary

Nowadays, one of the main tasks facing the JSC Russian Railways is the increase of volumes of freight transportation. The solution of this task is directly connected with the increase of the load on traction power system devices and their strengthening, which is primarily related to railways electrified with direct current that are characterized by high traction currents.

In order to assess the possibility to strengthen a railway section and reveal «bottlenecks» in traction power supply system it is necessary to create a mathematical model of traction power system that must consider parameters of a specific section including earth conductivity that affects the values of skin resistance, potential of railway network and stray currents.

The paper proposes a mathematical model of direct current traction power system that represents a combination of a catenary model and a model of railway network. The model considers parameters of traction substations, connection scheme of catenary suspensions and possible influence of rails from adjacent tracks on each other.

Keywords: traction power system model, double-track section, catenary, railway network, potential, boundary condition.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-75-79

В условиях постоянного повышения объемов перевозимых грузов по электрифицированным железным дорогам неуклонно растет нагрузка на системы электроснабжения. В большей степени это касается системы электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ. Повышение нагрузки приводит к увеличению тяговых токов и, как следствие, к усилению гальванического влияния электрифицированных железных дорог на подземные металлические сооружения [1, 2]. Гальваническое влияние обусловлено тем, что рельсовая сеть не изолирована от поверхности земли, вследствие чего создаются условия для растекания постоянных токов на значительные расстояния от железнодорожных путей электрифицированной линии. Кроме того, отсутствие изоляции между рельсовой сетью и поверхностью земли приводит к необходимости учитывать удельное сопротивление земли при моделировании работы тяговой сети. Таким образом, разработка математической модели тяговой сети постоянного тока, учитывающей проводимость земли, представляет собой актуальную задачу.

В [3, 4] рассматривалась математическая модель системы «рельсы — протяженный заземлитель», в основе которой лежит система уравнений, описанная в [5]. Модель позволяет учитывать неоднородность как рельсовой сети и протяженного заземлителя, так и продольную неоднородность земли. В общем случае в качестве «протяженного заземлителя» может рассматриваться любое подземное сооружение, не изолированное от земли: оболочки кабелей, трубопроводы и т.д. Недостаток модели состоит в том, что она не может учитывать параметры тяговых подстанций, а также схемы соединения контактных подвесок на многопутных участках.

Рассмотрим двухпутный участок постоянного тока, схема которого представлена на рис. 1. Пусть параметры тяговой сети неизменны по всей длине участка, а тяговые подстанции характеризуются величинами напряжения холостого хода и расчетного сопротивления.

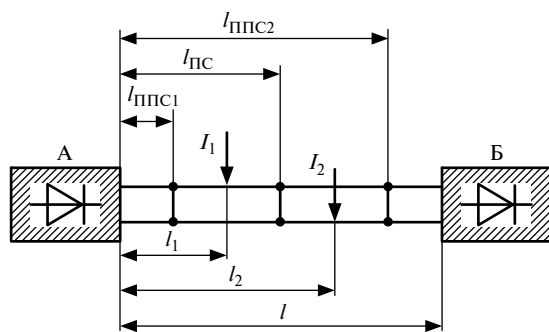


Рис. 1. Схема двухпутного участка постоянного тока:

l — расстояние между тяговыми подстанциями; l_1 — расстояние от левой тяговой подстанции до первого электровоза; l_2 — расстояние от левой тяговой подстанции до второго электровоза; $l_{ПСС1}$ — расстояние от левой тяговой подстанции до первого пункта параллельного соединения; $l_{ПСС2}$ — расстояние от левой тяговой подстанции до второго пункта параллельного соединения; $l_{ПС}$ — расстояние от левой тяговой подстанции до поста секционирования; I_1 — ток, потребляемый первым электровозом; I_2 — ток, потребляемый вторым электровозом

Для описания распределения потенциалов и токов обратной тяговой сети можно воспользоваться следующей системой дифференциальных уравнений [2]:

$$\left. \begin{aligned} -I_{P1}r_{P1} &= \frac{d\varphi_{P1}}{dx} \\ -I_{P2}r_{P2} &= \frac{d\varphi_{P2}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P1}}{r_{P31}} + (\varphi_{P1} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P1P2} &= -\frac{dI_{P1}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P2}}{r_{P32}} + (\varphi_{P2} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P1P2} &= -\frac{dI_{P2}}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где φ_{P1} , φ_{P2} — потенциалы рельсовых сетей нечетного и четного пути соответственно, В;

I_{P1} , I_{P2} — токи рельсовых сетей нечетного и четного пути соответственно, А;

r_{P1} , r_{P2} — продольные сопротивления рельсовой сети нечетного и четного пути соответственно, Ом/км;

r_{P31} , r_{P32} — переходные сопротивления рельсовой сети нечетного и четного пути соответственно, Ом/км;

g_{P1P2} — взаимная проводимость между рельсовой сетью нечетного и четного пути, См/км.

Величина взаимной проводимости может быть определена с помощью численного моделирования поперечного сечения пути [4].

Система уравнений (1) позволяет оценить величину потенциала и тока рельсовой сети каждого из путей в нормальном и аварийном режиме, при этом исходными данными будут координата и величина тока, втекающего в каждый из путей. Дополнительные сложности возникают при рассмотрении режима короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть. В этом случае ток замыкания как исходная величина может быть определен без учета проводимости земли, что сра-

зу вносит неточность в конечный результат расчета. Повысить точность результатов позволяет введение в математическую модель параметров тяговых подстанций и контактной сети.

Распределение потенциалов тяговой сети в целом может быть описано с помощью следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \frac{dI_{KC1}}{dx}; \quad 0 = \frac{dI_{KC2}}{dx} \\ I_{KC1}r_{KC1} &= -\frac{d\varphi_{KC1}}{dx}; \quad I_{KC2}r_{KC2} = -\frac{d\varphi_{KC2}}{dx} \\ -I_{P1}r_{P1} &= \frac{d\varphi_{P1}}{dx}; \quad -I_{P2}r_{P2} = \frac{d\varphi_{P2}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P1}}{r_{P31}} + (\varphi_{P1} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P1P2} &= -\frac{dI_{P1}}{dx}; \\ \frac{\varphi_{P2}}{r_{P32}} + (\varphi_{P2} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P1P2} &= -\frac{dI_{P2}}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где I_{KC1} , I_{KC2} — ток контактной сети нечетного и четного пути соответственно, А;

φ_{KC1} , φ_{KC2} — потенциал контактной сети нечетного и четного пути, В;

r_{KC1} , r_{KC2} — удельное сопротивление контактной сети нечетного и четного пути, Ом/км.

Главное отличие уравнений, описывающих распределение потенциалов и токов контактной сети, от системы уравнений (1) состоит в том, что у контактной сети нет распределенной связи с землей, следовательно, нет утечки тока из контактной сети. Стоит отметить, что возможной остается небольшая утечка тока через сопротивление изоляции контактной сети и сопротивление опор. Этот процесс необходимо учитывать в загрязненных районах вблизи промышленных предприятий, поскольку наличие загрязнения на поверхности изоляторов снижает их электрическую прочность.

Введение в математическую модель контактной сети нечетного и четного пути позволяет учитывать такие элементы системы электроснабжения, как посты секционирования и пункты параллельного соединения [6]. Все эти элементы, по сути, соединяют контактную или рельсовую сеть четного и нечетного пути. Учесть данные элементы можно путем задания граничных условий в местах их расположения.

Сформулировать граничное условие для пункта параллельного соединения позволяет схема замещения, представленная на рис. 2. Если применить к этой схеме закон Ома для участка цепи, можно выразить величину тока пункта параллельного соединения $I_{ПСС}$:

$$\varphi_{KC1}(x_{ПСС}) = -I_{ПСС} \cdot R_{ПСС} + \varphi_{KC2}(x_{ПСС}), \quad (3)$$

где $R_{ПСС}$ — сопротивление пункта параллельного соединения, Ом;

$x_{ПСС}$ — координата расположения пункта параллельного соединения, км.

Аналогичным образом граничное условие задается для междупутного рельсового соединителя на основе потенциа-

лов рельсовой сети нечетного и четного пути и сопротивление соединителя.

Пост секционирования принципиально отличается от пункта параллельного соединения наличием поляризованных выключателей и изолирующего сопряжения контактной сети в месте его установки. Схема замещения поста секционирования представлена на рис. 3.

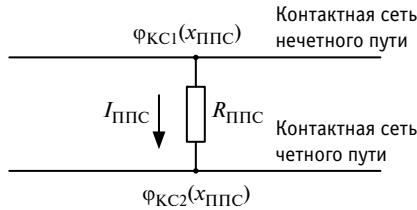


Рис. 2. Схема замещения пункта параллельного соединения

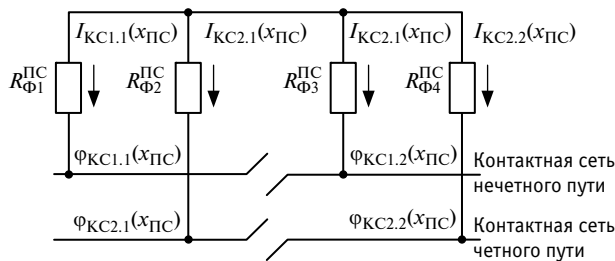


Рис. 3. Схема замещения поста секционирования

Для схемы замещения, представленной на рис. 3, можно записать систему уравнений по закону Ома для участка цепи, и эта система будет граничным условием в месте расположения поста секционирования:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{КС1.1}(x_{ПС}) + I_{КС1.1}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 1}^{ПС} - \\ - I_{КС2.1}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 2}^{ПС} = \Phi_{КС2.1}(x_{ПС}) \\ \Phi_{КС2.1}(x_{ПС}) + I_{КС2.1}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 3}^{ПС} - \\ - I_{КС2.2}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 4}^{ПС} = \Phi_{КС2.2}(x_{ПС}) \\ \Phi_{КС1.1}(x_{ПС}) + I_{КС1.1}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 1}^{ПС} - \\ - I_{КС1.2}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 3}^{ПС} = \Phi_{КС1.2}(x_{ПС}) \\ \Phi_{КС2.1}(x_{ПС}) + I_{КС2.1}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 2}^{ПС} - \\ - I_{КС2.2}(x_{ПС}) \cdot R_{\Phi 4}^{ПС} = \Phi_{КС2.2}(x_{ПС}) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $I_{КС1.1}(x_{ПС})$, $I_{КС2.1}(x_{ПС})$, $I_{КС1.2}(x_{ПС})$, $I_{КС2.2}(x_{ПС})$ — ток соответственно первого, второго, третьего и четвертого фидера поста секционирования, А;

$\Phi_{КС1.1}(x_{ПС})$ — потенциал контактной сети нечетного пути в месте подключения первого фидера поста секционирования, В;

$\Phi_{КС1.2}(x_{ПС})$ — потенциал контактной сети нечетного пути в месте подключения третьего фидера поста секционирования, В;

$\Phi_{КС2.1}(x_{ПС})$ — потенциал контактной сети нечетного пути в месте подключения второго фидера поста секционирования, В;

$\Phi_{КС2.2}(x_{ПС})$ — потенциал контактной сети нечетного пути в месте подключения четвертого фидера поста секционирования, В;

$R_{\Phi 1}^{ПС}$, $R_{\Phi 2}^{ПС}$, $R_{\Phi 3}^{ПС}$, $R_{\Phi 4}^{ПС}$ — сопротивление соответственно первого, второго, третьего и четвертого фидера поста секционирования, Ом.

Из системы уравнений (4) видно, что потенциалы контактной сети относительно земли слева и справа от изолированного сопряжения будут отличаться друг от друга на величину падения напряжения в сопротивлении фидеров поста секционирования.

Не менее важный элемент системы электроснабжения постоянного тока — тяговая подстанция, параметры которой определяют распределение тяговых токов на межподстанционной зоне. Параметры тяговых подстанций также могут быть учтены путем задания граничных условий в местах их расположения при рассмотрении схемы замещения по рис. 4.

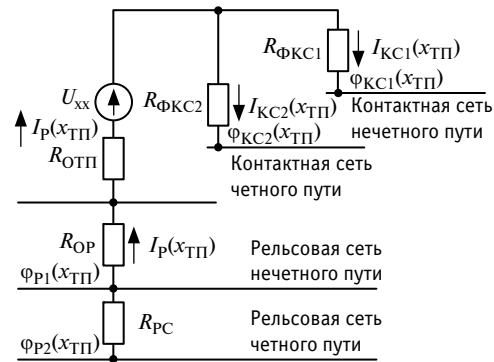


Рис. 4. Схема замещения тяговой подстанции двухпутного участка

Система уравнений, описывающая схему замещения по рис. 4 и представляющая собой граничные условия в месте расположения тяговой подстанции, примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} I_{Р1}(x_{ТП}) + I_{Р2}(x_{ТП}) &= I_{\Phi 1}(x_{ТП}) + I_{\Phi 2}(x_{ТП}); \\ -I_{\Phi 1}(x_{ТП}) \cdot R_{\Phi КС1} - (I_{Р1}(x_{ТП}) + I_{Р2}(x_{ТП})) \cdot R_{ОП} + U_{ХХ} \\ - (I_{Р1}(x_{ТП}) + I_{Р2}(x_{ТП})) \cdot R_{ОР} &= \Phi_{КС1}(x_{ТП}) - \Phi_{Р1}(x_{ТП}); \\ -I_{\Phi 2}(x_{ТП}) \cdot R_{\Phi КС2} - (I_{Р1}(x_{ТП}) + I_{Р2}(x_{ТП})) \cdot R_{ОП} + U_{ХХ} \\ - (I_{Р1}(x_{ТП}) + I_{Р2}(x_{ТП})) \cdot R_{ОР} &= \Phi_{КС2}(x_{ТП}) - \Phi_{Р1}(x_{ТП}); \\ \Phi_{Р2}(x_{ТП}) &= I_{Р2}(x_{ТП}) \cdot R_{РС} + \Phi_{Р1}(x_{ТП}) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $I_{Р1}(x_{ТП})$, $I_{Р2}(x_{ТП})$ — ток рельсовой сети в месте расположения тяговой подстанции нечетного и четного пути соответственно, А;

$I_{\Phi 1}(x_{ТП})$, $I_{\Phi 2}(x_{ТП})$ — ток контактной сети в месте расположения тяговой подстанции нечетного и четного пути соответственно, А;

$U_{ХХ}$ — напряжение холостого хода тяговой подстанции, В;

$R_{ОП}$ — расчетное сопротивление тяговой подстанции, Ом;

$R_{\Phi КС1}$, $R_{\Phi КС2}$ — сопротивление фидеров контактной сети нечетного и четного пути соответственно, Ом;

$R_{ОР}$ — сопротивление фидера обратного тока, Ом;

$\Phi_{P1}(x_{ТП})$, $\Phi_{P2}(x_{ТП})$ — потенциал рельсовой сети в месте расположения тяговой подстанции нечетного и четного пути соответственно, В;

$\Phi_{КС1}(x_{ТП})$, $\Phi_{КС2}(x_{ТП})$ — потенциал контактной сети в месте расположения тяговой подстанции нечетного и четного пути соответственно, В.

На рис. 4 изображена схема замещения тяговой подстанции, осуществляющей одностороннее питание подстанционной зоны. При рассмотрении варианта двустороннего питания схема дополняется еще двумя фидерами контактной сети. В этом случае граничные условия будут определяться уже 6 уравнениями аналогично системе (5).

Все приведенные выше системы уравнений позволяют определить величины токов тяговой сети в местах расположения ключевых элементов системы электроснабжения с помощью потенциалов рельсовой и контактной сети. Для применения представленной математической модели тяговой сети наиболее предпочтителен метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе Comsol Multiphysics [7].

С целью верификации предложенной модели был рассмотрен реальный участок Свердловской железной дороги между тяговыми подстанциями Сарга и Сабик. Полученные результаты моделирования сравнивались с результатами расчета мгновенных схем, выполненными в программном комплексе «КОРТЭС». В этом случае моделирование проводилось без учета проводимости земли и связи между рельсами смежных путей, поскольку при расчете в программном комплексе «КОРТЭС» указанные величины не учитываются. Расчетная схема межподстанционной зоны Сарга — Сабик представлена на рис. 5.

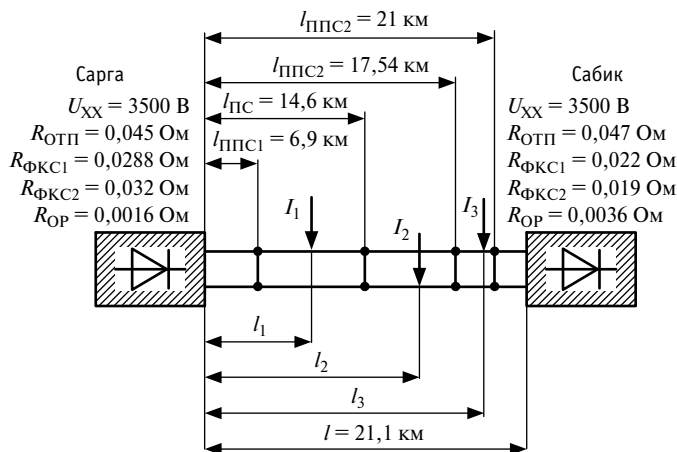


Рис. 5. Расчетная схема межподстанционной зоны Сарга — Сабик

Протяженность межподстанционной зоны Сарга — Сабик составляет 21,1 км, на всем протяжении применяются контактная подвеска М-95+2МФ-100+2А-185 и рельсы Р-65. В качестве нормальной принята параллельная схема с одним постом секционирования Берлога и тремя пунктами параллельного соединения: 1693, 1704 и 1707 км. Остальные данные, необходимые для моделирования работы указанного участка, приведены на рис. 5.

Для верификации рассматривались разные варианты расположения трех нагрузок на межподстанционной зоне, потреблявших различный ток. Непосредственно сравнивались величины токов фидеров тяговых подстанций. Результаты верификации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета токов фидеров тяговых подстанций Сарга и Сабик с помощью математической модели тяговой сети и программы «КОРТЭС»

Вариант расположе- ния нагрузок	Математическая модель				Программа «КОРТЭС»				Погрешность, %
	Тяговая подстан- ция Сарга		Тяговая подстан- ция Сабик		Тяговая подстан- ция Сарга		Тяговая подстан- ция Сабик		
	Ток фидера, А								
	1	2	1	2	1	2	1	2	
$I_1 = 2000 \text{ A}$ $l_1 = 5 \text{ км}$ $I_2 = 1500 \text{ A}$ $l_2 = 10 \text{ км}$ $I_3 = 1000 \text{ A}$ $l_3 = 16 \text{ км}$	1425	1047	1010	1018	1535	985	990	990	4,58
$I_1 = 1000 \text{ A}$ $l_1 = 12 \text{ км}$ $I_2 = 1500 \text{ A}$ $l_2 = 17 \text{ км}$ $I_3 = 2000 \text{ A}$ $l_3 = 19 \text{ км}$	598	590	1649	1663	571	571	1679	1679	2,71
$I_1 = 1500 \text{ A}$ $l_1 = 15 \text{ км}$ $I_2 = 2000 \text{ A}$ $l_2 = 18 \text{ км}$ $I_3 = 1000 \text{ A}$ $l_3 = 20 \text{ км}$	542	535	1704	1719	511	511	1739	1739	3,46
$I_1 = 1000 \text{ A}$ $l_1 = 6 \text{ км}$ $I_2 = 1500 \text{ A}$ $l_2 = 18,5 \text{ км}$ $I_3 = 900 \text{ A}$ $l_3 = 15,5 \text{ км}$	647	598	1073	1082	683	553	1082	1082	3,53
$I_1 = 500 \text{ A}$ $l_1 = 16,5 \text{ км}$ $I_2 = 2000 \text{ A}$ $l_2 = 7 \text{ км}$ $I_3 = 500 \text{ A}$ $l_3 = 19,5 \text{ км}$	742	732	760	766	747	747	753	753	1,34

Как видно из табл. 1, средняя погрешность в каждом из рассмотренных вариантов расположения нагрузок на межподстанционной зоне не превышает 5 %, что говорит об адекватности полученных результатов.

Проведенная верификация позволяет использовать рассмотренную математическую модель для исследования токораспределения в элементах тяговой сети постоянного тока. При этом достоинством предложенной модели является возможность оценить не только величину тока в контактной, но и в обратной тяговой сети с учетом проводимости земли и влияния рельсов смежных путей друг на друга.

Реализация модели в среде конечно-элементного моделирования Comsol Multiphysics позволяет учитывать различные неоднородности обратной тяговой сети, а также наличие подземных сооружений. Дальнейшим направлением совершен-

ствования математической модели является включение в нее различных конструкций и сооружений, связанных с обратной тяговой сетью, таких как опоры контактной сети, заземляющие устройства сигнальных точек и т.д.

Литература

1. Котельников А. В., Кандаев В. А. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография. Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. 552 с.
2. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Москва : Интекст, 2008. 480 с.
3. Кузнецов К. Б., Лесников Д. В. Совершенствование системы заземления при защите опор контактной сети постоянного тока от электрической коррозии // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 113–118. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-113-118. ISSN 1815–9400.
4. Лесников Д. В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1982. 528 с.
6. Лесников Д. В. Совершенствование тяговых сетей постоянного тока с помощью протяженных заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2018. 279 с.
7. Лесников Д. В. О возможности применения метода конечных элементов при расчете протяженного дренающего заземляющего устройства // Инновационный транспорт — 2016: специализация железных дорог : материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. Вып. 8 (227). С. 80–92.

References

1. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. Circulating currents and exploitation control of the corrosive condition of underground structures of power supply systems for railway transport [Bluzhdayushhie toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta] : monograph. Moscow : UMTs ZhDT, 2013. 552 p.
2. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Basic principles of electromagnetic safety of power supply systems of railway transport [Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow : Intext, 2008. 480 p.
3. Kuznetsov K. B., Lesnikov D. V. Improvement of earthing system when protecting DC overhead structures against electrical corrosion [Sovershenstvovanie sistemy zazemleniya pri zashhite opor kontaktnoy seti postoyannogo toka ot elektricheskoy korrozii] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 113–118. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-113-118. ISSN 1815–9400.
4. Lesnikov D. V. Improvement of the method of the calculation of extended grounders in the stations of a constant current [Sovershenstvovanie metodiki rascheta protyazhennykh zazemliteley na uchastkakh postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2017. No. 1 (52). Pp. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
5. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
6. Lesnikov D. V. Development of direct current traction power system with the use of extended grounding devices of catenary reinforced concrete poles [Sovershenstvovanie tyagovykh setey postoyannogo toka s pomoshh'yu protyazhennykh zazemlyayushhikh ustroystv zhelezobetonnykh opor kontaktnoy seti] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2018. 279 p.
7. Lesnikov D. V. About possibility of using the finite element method in the calculation of an extended drainage grounding device [O vozmozhnosti primeneniya metoda konechnykh elementov pri raschete protyazhenno-go dreniruyushhego zazemlyayushhego ustroystva] // Innovative transport — 2016: railway specialization : materials of International scientific and practical conference. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. Issue 8 (227). Pp. 80–92.

Объем статьи 0,52 авторских листа

УДК 621.336.2

Антон Сергеевич Голубков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Анатолий Игоревич Слатин, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Александр Николаевич Смердин, доктор технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ МАТРИЦ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Anton Sergeevich Golubkov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Anatoliy Igorevich Slatin, postgraduate student, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Alexander Nikolaevich Smerdin, DSc in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Application of low-resolution thermal-imaging arrays in systems of performance monitoring of electric rolling stock current collectors

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы диагностики и мониторинга работоспособности токоприемников электроподвижного состава, эксплуатируемого в режимах повышенных нагрузок. Приведены конструктивные особенности токоприемников, которые необходимо учитывать при эксплуатации. Описаны преимущества применения тепловизионных матриц низкого разрешения в системах контроля. Предложены способы минимизации генерируемого информационного массива, позволяющие сократить затраты на сбор и обработку информации на аппаратном и программном уровнях. Представлен разработанный алгоритм обработки информации с помощью сверточной нейронной сети, рассмотрена его реализация на примере анализа термограммы системы подвижных рам.

Ключевые слова: токоприемник, система диагностики, тепловизионная матрица, информационный массив, искусственная нейронная сеть.

Summary

The paper considers issues of diagnostics and performance monitoring of current collectors of electric rolling stock that is used in high load modes. It presents design peculiarities of current collectors that should be considered in operation. The paper also describes the advantages of application of low-resolution thermal-imaging arrays in systems of monitoring. The authors propose methods of minimization of the information array that allows reducing costs on collection and processing of information on hardware and software levels. As a result, the authors present a developed algorithm for information processing with the use of highly precise neural network and describe it's realization on example of analysis of thermogram of a movable frames system.

Keywords: current collector, diagnostic system, thermal imaging array, information array, artificial neural network.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-80-85

Распоряжениями Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» [1] и от 11.06.2014 г. № 1032-р «Изменения, которые вносятся в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года» [2] предусмотрено повышение энергетической эффективности и применение ресурсосберегающих технологий в перевозочном процессе.

Электроподвижной состав магистральных электрических железных дорог (ЭПС) совершенствуется в условиях жесткой конкуренции с другими видами транспорта, поэтому снижение затрат электроэнергии на тягу и металлоемкости конструкций является важным ресурсом экономики издержек [2].

Современные токоприемники электропоездов и электропоездов, представляющие собой изделия с плохой обтекаемыми формами, генерируют до 1 кН лобового аэродинамического сопротивления [3], что вносит значительный вклад в общее сопротивление движения электропоезда [4].

Появление новых и улучшение свойств известных конструктивных материалов создает предпосылки для оптимизации конструкции токоприемников, уменьшения их массы и поперечного сечения без снижения проводимости, прочности, жесткости и срока службы. При этом высокие потребительские свойства материалов достигаются за счет термического и деформационного упрочнения.

Система подвижных рам (СПР) токоприемника (рис. 1) относится к числу самых механически и электрически нагруженных, при этом она обладает значительной массой и создает до 80 % аэродинамического сопротивления токоприемника [5, 6].

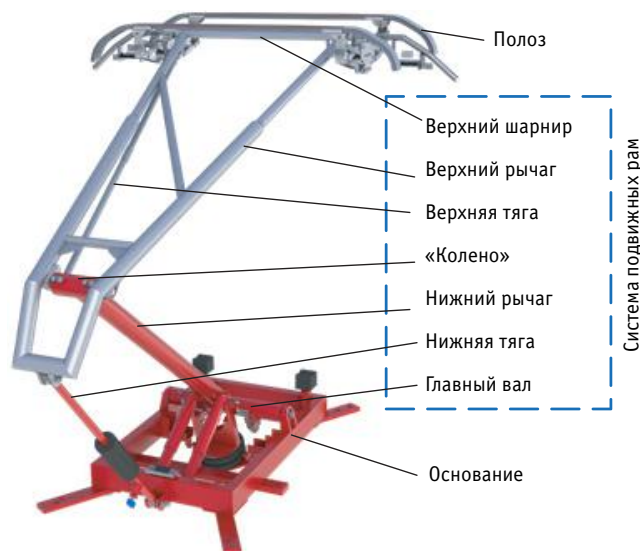


Рис. 1. Основные элементы системы подвижных рам токоприемника асимметричной конструкции

Инновационные технические решения, направленные на снижение массы и поперечного сечения рычагов СПР [7] в основном базируются на применении инновационных конструкционных материалов, прошедших дополнительную обработку (закалку, отпуск, старение, прокат, наклеп и т.д.) [8]. Известны также решения, в которых поперечное сечение рычагов СПР удается снизить за счет использования наполнителя в виде металлической пены [9]. Комбинированные электропроводящие и силовые элементы имеют повышенную чувствительность к тепловому воздействию [10, 11], поэтому в случае их применения в конструкции токоприемников необходимо контролировать нагрев.

а



Для контроля работоспособности токоприемников в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок используются устройства (рис. 2), расположенные на крыше электроподвижного состава [12].

Среди прочих параметров они способны контролировать температуру устройств, попадающих в рабочую область [13, 14]. При этом расшифровка и анализ результатов диагностирования предполагают вычленение нужных объектов среди множества попавших в кадр тепловизора.

Устройства данного вида, как правило, оснащены накопителями информации значительного объема, так как поток данных, поступающих с телевизионных, тепловизионных и ультразвуковых камер, достигает 1 Гбит/с. Расшифровка и аналитическая обработка информационных данных «на лету» затруднительна, требует применения ЭВМ высокой производительности, что значительно удорожает стоимость и накладывает ограничение на автономность. В связи с этим системы контроля работоспособности токоприемников, основанные на применении оптических устройств, не получили широкого распространения.

В Омском государственном университете путей сообщения в лаборатории «Контактные сети, линии электропередачи и токосъем» на инициативной основе ведется разработка специализированного автономного модуля, предназначенного для контроля и регистрации температуры системы подвижных рам токоприемника (рис. 3).

Так как диапазон измерения высоты токоприемника в рабочем положении достигает 1,5 м, область, в которой может находиться СПР, имеет высоту около 3 м от крыши ЭПС, что требует применения широкоугольной оптической системы.

Основу устройства представляет собой тепловизионная микроболометрическая матрица (рис. 4).

Современные тепловизионные устройства промышленного качества способны создавать изображения с разрешением до 1920×1080 пикселей и частотой кадров более 30 с^{-1} . При этом разрядность достигает 8 бит (256 градаций яркости). Программное обеспечение таких устройств позволяет выявлять наиболее и наименее нагретые области кадра, проводить статистические вычисления и накапливать данные об изменении температурных показателей выбранных областей.

б

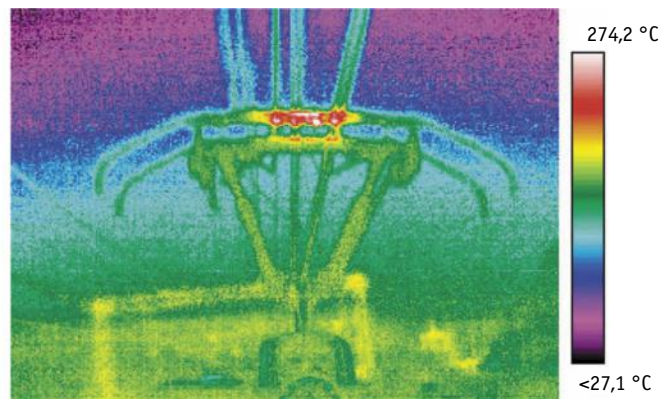


Рис. 2. Размещение тепловизионного оборудования на крыше электроподвижного состава:

а — комплект измерительных камер; б — термограмма токоприемника

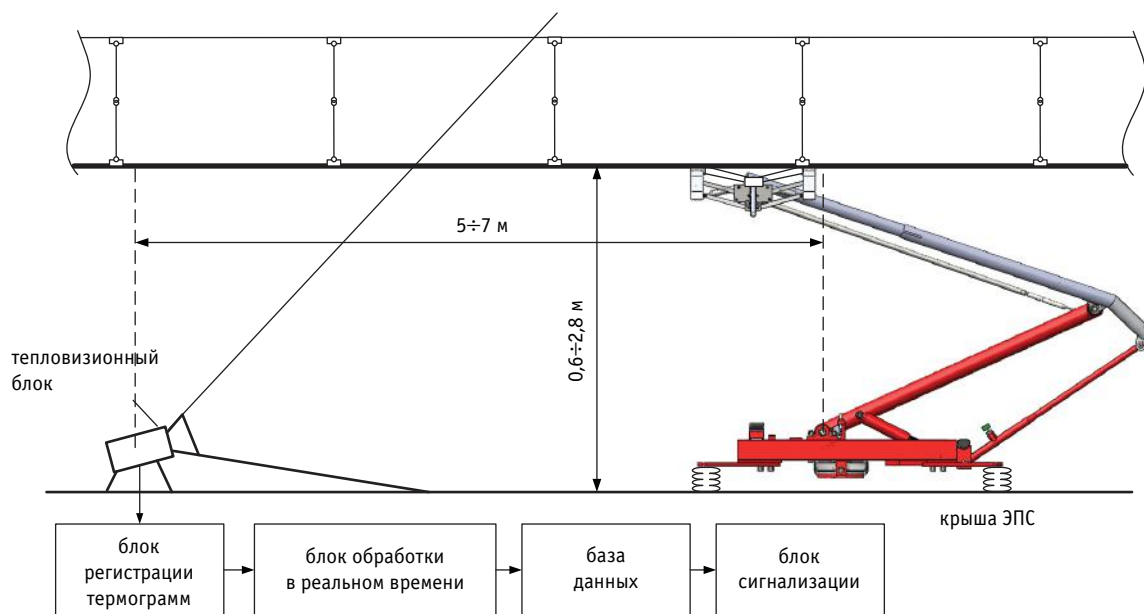


Рис. 3. Расположение элементов системы регистрации нагрева токоприемника на крыше электроподвижного состава

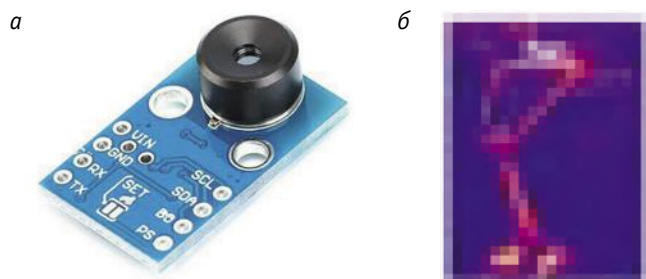


Рис. 4. Вариант исполнения микроболومترической тепловизионной матрицы:

а — оптическая система; б — термограмма низкого разрешения

Сложность вызывает определение расположения в кадре объекта, температуру которого нужно контролировать. Обычно это делается вручную с помощью оператора или дополнительных устройств позиционирования.

В разработанной системе контроля программное обеспечение для распознавания сигнала матрицы базируется на использовании искусственной нейронной сети — классификатора.

Использование полносвязных искусственных нейронных сетей или сетей с прямым распространением для распознавания изображений оправданно тогда, когда на вход подаются кадры, обладающие множеством мелких отличительных признаков. В этом случае большая размерность входного вектора и, как следствие, большое количество нейронов в промежуточных слоях оправданны.

Для дистанционного определения температуры элементов системы подвижных рам токоприемника в автоматическом режиме предлагается использовать тепловизионные матрицы низкого разрешения, так как это позволяет значительно снизить стоимость оборудования, повысить энергетическую и информационную эффективность системы контроля, снизить требо-

вания к мощности электропитания и пропускной способности каналов связи.

Для анализа кадра с разрешением 32×40 пикселей требуется 1280 нейронов во входном слое. Количество нейронов скрытых слоев, как правило, в 10–20 раз больше. Нейронная сеть-классификатор состоит из двух скрытых слоев, в которых образуется более 1 млн связей между нейронами.

Выходной слой содержит не более 40 нейронов, что соответствует максимальной разрешающей способности регистрирующей матрицы по высоте. Каждая связь между нейронами имеет настраиваемый вес, для которого в процессе обучения нейронной сети вычисляется значение.

Подготовка и использование искусственной нейронной сети для обработки 2D-термограмм требует значительных вычислительных ресурсов, что, в свою очередь, приводит к удорожанию и повышению энергопотребления мобильных комплексов мониторинга.

В предлагаемом методе предусмотрено применение сверточной нейронной сети [15] для предварительного определения высотного положения полоза токоприемника в кадре размерностью 40×32 пикселей (40 строк и 32 столбца) в реальном времени.

Ядром свертки служит вектор, содержащий 32 элемента, что соответствует горизонтальному разрешению регистрирующей матрицы. Значения, которые могут принимать элементы ядра свертки, находятся в диапазоне от 0 до 255, что соответствует разрядности матрицы. Элементы расположены в порядке возрастания.

Алгоритм работы программного обеспечения включает в себя несколько этапов.

Первый этап — определение в кадре горизонтального нагретого выше температуры окружающей среды элемента — полоза токоприемника. На этом этапе термограмма (рис. 5а) должна быть преобразована в массив данных о температуре.

Он записывается в виде матрицы с размерностью $h \times l$ (рис. 5б), в которой каждое число соответствует «температуре» пикселя термограммы в градусах Цельсия:

$$X = (x_{i,j})_{40 \times 32}. \quad (1)$$

Полученную матрицу необходимо преобразовать таким образом, чтобы количество столбцов соответствовало разрядности измерения температуры k , а значение элементов матрицы — количеству имеющих соответствующую температуру ячеек в ряду.

Матрица $T = (t_{i,k})_{40 \times 256}$ — это табличное представление распределения температуры на термограмме.

В рамках предлагаемой методики для автоматического обнаружения на термо-

грамме полоза необходимо выполнить построчную свертку получившейся матрицы T с помощью вектора N^K :

$$N^K = [1 \ 2 \ 3 \ \dots \ 256]; \quad (2)$$

$$Y^i = T \cdot N^K. \quad (3)$$

Полученный в результате вектор Y^i представляет собой распределение интенсивности нагрева по высоте кадра.

Ряд, имеющий максимальное значение y_{\max} в векторе Y^i , соответствует положению полоза относительно базовой плоскости измерительной системы.

Второй этап — нахождение координат рычагов системы подвижных рам в области, расположенной ниже полоза токоприемника. В зависимости от зара-

нее заданного типа токоприемника формируется матрица области расположения системы подвижных рам:

$$U = (U_{i,j})_{h_0 \times 32}, \quad (4)$$

где h_0 — количество рядов матрицы U ,

$$h_0 = 40 - m, \quad (5)$$

где m — порядковый номер элемента y_{\max} вектора Y^i .

Вертикальные координаты областей, температура которых заносится в базу данных, зависят от высоты полоза [16], благодаря чему имеется возможность определить расположение верхних рычагов, нижних рычагов, колена токоприемника и т.д. (рис. 6).

Горизонтальные координаты контролируемых областей от высоты не зависят и задаются в программу заранее.

Третий этап — вычисление температуры каждого из выделенных элементов на основе учета степени черноты покрытия элементов системы подвижных рам с усреднением по времени. Для этого в окрестностях определенных на предыдущем этапе координат с помощью обработки медианным фильтром формируется массив значений температуры из нескольких элементов. Значения апертур выбираются с учетом геометрических размеров рычагов системы подвижных рам в месте контроля и для рассматриваемого случая составляют по три отсчета для верхнего рычага и по пять — для нижнего.

Максимальные значения температуры каждого из массивов записываются в долговременную память устройства и служат для расчета тепловой деградации элементов токоприемника. По достижении предельного уровня токоприемник необходимо демонтировать с электроподвижного состава, после чего провести необходимые технологические операции для восстановления работоспособности.

По результатам проведенных исследований в лаборатории «Контактные сети, линии электропередачи и токоосъем» ОмГПСа разработано программное обеспечение, с помощью которого реализован представленный алгоритм (рис. 7). Благодаря предложенному подходу объем обработки информации при определении нагрева элементов системы подвижных

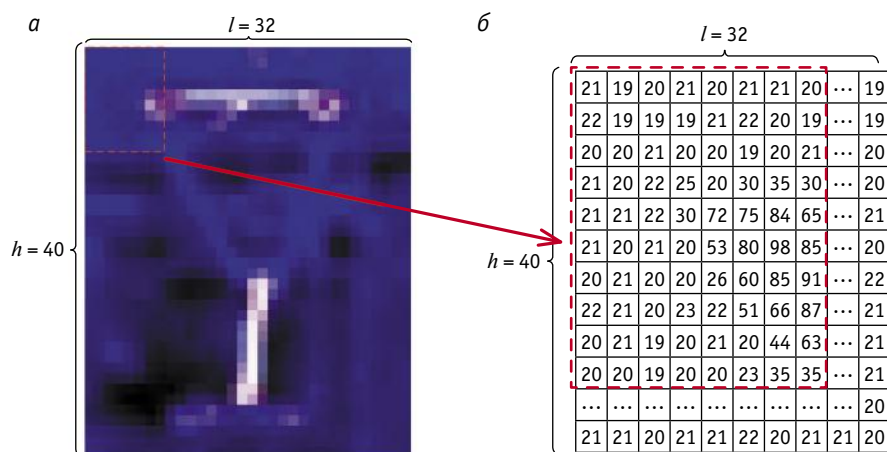


Рис. 5. Определение области расположения полоза токоприемника:

а — термограмма низкого разрешения; б — преобразование к числовым значениям (фрагмент)

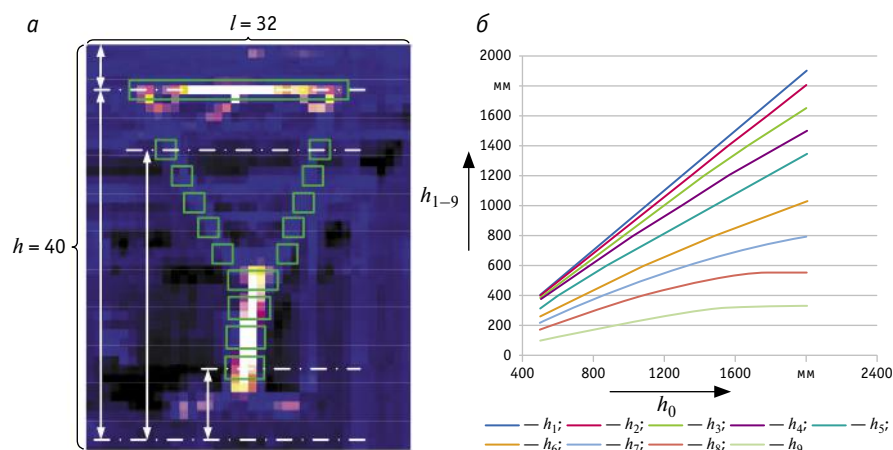


Рис. 6. Определение координат областей контроля температуры:

а — расположение областей контроля температуры; б — функциональные зависимости высотного положения областей контроля от высоты полоза токоприемника

рам токоприемника электроподвижного состава машинным способом удалось уменьшить более чем в 20 раз (с 1280 до 50–60 ячеек тепловизионной матрицы), что, в свою очередь, привело к сокращению размеров базы данных, снижению энергопотребления, повышению скорости обработки информации и позволило увеличить продолжительность автономной работы комплексов для контроля работоспособности устройств токосъема.

Алгоритм описывает принцип работы модуля и может быть введен в программное обеспечение более сложных систем технической диагностики, благодаря чему область его применения может быть расширена за счет мобильных диагностических комплексов контактной сети. Кроме того, после незначительной модернизации данный алгоритм можно применять в устройствах стационарной электроэнергетики.

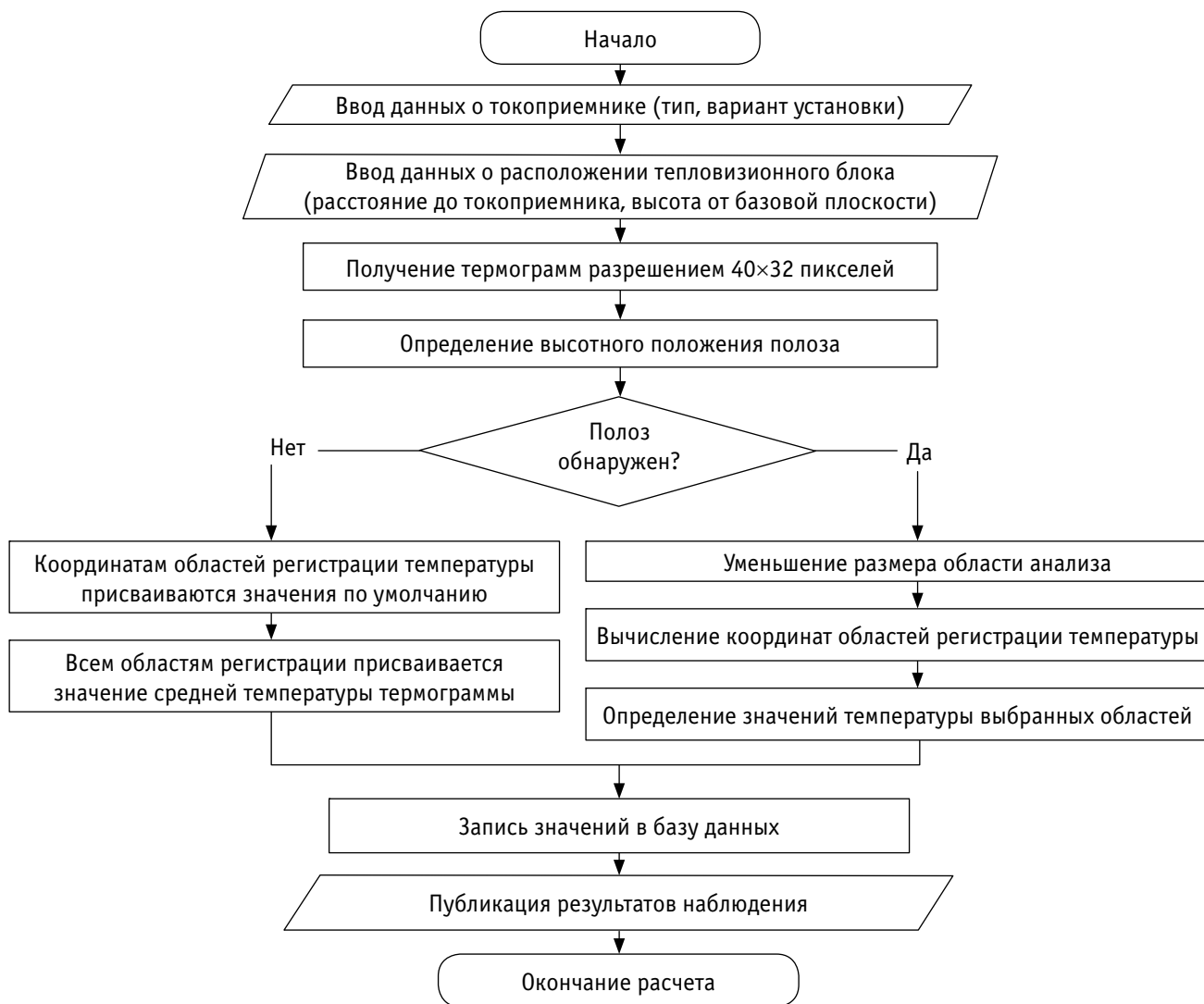


Рис. 7. Алгоритм работы программного обеспечения для анализа термограмм

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (дата обращения: 15.04.2020).
2. Об изменениях, которые вносятся в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.06.2014 г.

References

1. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 22.11.2008 No. 1734-r. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (access date: 15.04.2020).
2. About amendments in Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 [Ob izmeneniyakh, kotorye vnosyatsya v Transportnuyu strategiyu Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda] : Order of the

- № 1032-р. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/2/3895> (дата обращения: 15.04.2020).
3. Смердин А. Н., Чепурко А. Е. Особенности применения CFD-метода при расчете аэродинамических сил токоприемника электроподвижного состава // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 107–112. ISSN 1815–9400.
 4. Джаббаров С. Т. Исследование аэродинамического давления при прохождении высокоскоростного поезда // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. № 5 (65). С. 92–100. ISSN 2307–3489.
 5. Ецков Т. А., Попов П. В. Исследование аэродинамических характеристик скоростного токоприемника. Часть первая // Вестник ВЭЛНИИ. 2014. № 1 (67). С. 28–37. ISSN 1816–1928.
 6. Ецков Т. А., Арестова Н. В., Попов П. В. Исследование аэродинамических характеристик скоростного токоприемника. Часть вторая // Вестник ВЭЛНИИ. 2015. № 1 (69). С. 27–38. ISSN 1816–1928.
 7. Design of carbon/epoxy-aluminum hybrid upper arm of the pantograph of high-speed trains using adhesive bonding technique / Jeon S.-W., Cho Y. H., Han M.-G., Chang S.-H. // Composite Structures. 2016. 152. Pp. 538–545.
 8. Design and fabrication of a metal-composite hybrid pantograph upper arm by co-cure technique with a friction layer / Jeon S.-W., Cho Y. H., Han M.-G., Chang S.-H. // Composite Structures. 2017. 174. Pp. 166–175.
 9. Токоприемник электроподвижного состава / А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, Е. А. Бутенко, А. В. Рыжков : патент на полезную модель 187592 Российская Федерация. № 2018139666 ; заявл. 08.11.18 ; опубл. 12.03.19, Бюл. № 8.
 10. Уточнение теории возврата механических свойств применительно к сплаву АМг6 / Д. А. Мирзаев, Ю. Д. Корягин, А. С. Добрынина, А. А. Звонков // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2002. № 2. С. 31–40. ISSN 1815–9400.
 11. Конструкционные материалы в самолетостроении / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. Киев : ООО «КВИЦ», 2015. 400 с.
 12. Landi A., Sani L. Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system // Journal of Rail and Rapid Transit. 2006. 220. Pp. 435–447.
 13. Совершенствование методов контроля технического состояния скоростных токоприемников с использованием программного комплекса ОмГУПСa / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, А. С. Голубков // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах : материалы VII Международной научно-практической конференции. Новочеркасск, 2006. Ч. 1. С. 49–52.
 14. Смердин А. Н., Голубков А. С., Найден С. Н. Автоматизированная система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава на основе видеоизмерительного комплекса // Известия Транссиба. 2012. № 2. С. 103–109. ISSN 1815–9400.
 15. Simard P. Y., Steinkraus D., Platt J. C. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis : Proceedings of Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2003. Pp. 958–962.
 16. Smerdin A., Ryzhkov A., Demin Yu. Improvement of the method of calculation of the parameters of the universal current collector with the increased motion speeds // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. DOI: 10.1051/mateconf/201823901040.
 - Government of the Russian Federation dated 11.06.2014 No. 1032-r. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/2/3895> (access date: 15.04.2020).
 3. Smerdin A. N., Chepurko A. E. Application peculiarities of CFD-method in calculation of electrically moved vehicles current collective device aerodynamic forces [Osobennosti primeneniya CFD-metoda pri raschete aerodinamicheskikh sil tokopriemnika elektropodvizhnogo sostava] // Transport of the Urals. 2013. No. 3 (38). Pp. 107–112. ISSN 1815–9400.
 4. Djabbarov S. T. Investigation of aerodynamic pressure during the high-speed train passage [Issledovanie aerodinamicheskogo davleniya pri prokhozhdanii vysokoskorostnogo poezda] // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. 2016. No. 5 (65). Pp. 92–100. ISSN 2307–3489.
 5. Etskov T. A., Popov P. V. Analysis of aerodynamic properties of high-speed current. Part 1 [Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik skorostnogo tokopriemnika. Chast' pervaya] // Vestnik VEINII. 2014. No. 1 (67). Pp. 28–37. ISSN 1816–1928.
 6. Etskov T. A., Arestova N. V., Popov P. V. Analysis of aerodynamic properties of high-speed current. Part 2 [Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik skorostnogo tokopriemnika. Chast' vtoraya] // Vestnik VEINII. 2015. No. 1 (69). Pp. 27–38. ISSN 1816–1928.
 7. Design of carbon/epoxy-aluminum hybrid upper arm of the pantograph of high-speed trains using adhesive bonding technique / Jeon S.-W., Cho Y. H., Han M.-G., Chang S.-H. // Composite Structures. 2016. 152. Pp. 538–545.
 8. Design and fabrication of a metal-composite hybrid pantograph upper arm by co-cure technique with a friction layer / Jeon S.-W., Cho Y. H., Han M.-G., Chang S.-H. // Composite Structures. 2017. 174. Pp. 166–175.
 9. Current collector of electric rolling stock [Tokopriemnik elektropodvizhnogo sostava] / A. N. Smerdin, I. E. Chertkov E. A. Butenko, A. V. Ryzhkov : patent for utility model 187592 Russian Federation. No. 2018139666 ; filed 08.11.18 ; publ. 12.03.19, Bulletin No. 8.
 10. Improvement of the theory of recovery of mechanical properties with reference to the AMg6 alloy [[Utochneniye teorii vozvrata mekhanicheskikh svoystv primenitel'no k splavu AMg6] / D. A. Mirzaev, Yu. D. Koryagin, A. S. Dobryнина, A. A. Zvonkov // Bulletin of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2002. No. 2. Pp. 31–40. ISSN 1815–9400.
 11. Structural materials in aircraft construction [Konstruktsionnye materialy v samoletostroyenii] / A. G. Molar, A. A. Kotsyuba, A. S. Bychkov, O. Yu. Nechiporenko. Kiev : LLC «KVITs», 2015. 400 p.
 12. Landi A., Sani L. Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system // Journal of Rail and Rapid Transit. 2006. 220. Pp. 435–447.
 13. Improving the methods of monitoring the technical condition using the OSTU software package [Sovershenstvovanie metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya skorostnykh tokopriemnikov s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa OmGUPSa] / O. A. Sidorov, A. N. Smerdin, I. E. Chertkov, A. S. Golubkov // Computer technologies in science, production, social and economic processes : materials of VII International scientific and practical conference. Novocherkassk, 2006. Part 1. Pp. 49–52.
 14. Smerdin A. N., Golubkov A. S., Nayden S. N. Automated system for diagnosing the condition of current collectors of electric rolling stock based on a video-measuring complex [Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki sostoyaniya tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava na osnove videoizmeritel'nogo kompleksa] // Journal of Transsib Railway Studies. 2012. No. 2. Pp. 103–109. ISSN 1815–9400.
 15. Simard P. Y., Steinkraus D., Platt J. C. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis : Proceedings of Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2003. Pp. 958–962.
 16. Smerdin A., Ryzhkov A., Demin Yu. Improvement of the method of calculation of the parameters of the universal current collector with the increased motion speeds // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. DOI: 10.1051/mateconf/201823901040.

УДК 004.942:621.336:62-71

Валерий Викторович Томилов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Сандугаш Мырзабековна Утепбергенова, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Олег Алексеевич Сидоров, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА В РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Valeriy Viktorovich Tomilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Sandugash Myrزابekovna Utepbergenova, postgraduate student, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Oleg Alexeevich Sidorov, DSc in Engineering, Professor, Head of Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Pantograph cooling system mathematical model during motion of the railway electric transport

Аннотация

Неравномерность нагрева полоза токоприемника является причиной ограничения съема токоприемником максимально допустимого длительного тока с контактной сети. Наибольший нагрев наблюдается в центре контактной вставки относительно оси пути, что может быть учтено при разработке устройства охлаждения полоза. Существующие модели теплового состояния ползозов токоприемника не описывают переходные режимы распределенного нагрева конструкции замкнутого типа (европолоз) в результате воздействия контактного провода в плане при движении подвижного состава. Методики расчета нагрева полоза требуют использования специальных программ для разработки его трехмерной модели и значительных мощностей электронно-вычислительных машин. В статье представлены математические модели европолоза типовой конструкции и конструкции, оснащенной системой пассивного охлаждения его центра через каркас за счет устройства типа конфузор. Модели позволяют рассчитать нагрузочные характеристики полоза, оценить снижение неравномерности нагрева его конструкции и определить величины максимального допустимых длительных токов токоприемника.

Ключевые слова: ползоз токоприемника, охлаждение, нагрев, метод эквивалентных тепловых схем замещения, нагрузочная характеристика, тяговый ток, максимально допустимый длительный ток, теплоемкость, теплоотдача.

Summary

Uneven heating of the pantograph slide is the reason for limiting the pantograph removal of the maximum permissible long-term current from the contact network. The highest heating point is observed in the center of the pantograph head relative to the path axis, which can be taken into account when developing a pantograph slide cooling device. Existing models of the thermal state of the pantograph slide do not describe the transient modes of distributed heating of a closed-type structure (euro pantograph head) as a result of the impact of a contact wire in the plan when moving a rolling stock. Existing methods for calculating the heating of the pantograph slide require the use of special programs for the development of its three-dimensional model and significant power of electronic computers. The paper presents a mathematical model euro pantograph head standard design and are equipped with passive cooling system the center through the frame device of the confuser type, which can calculate the load characteristics of the pantograph slide, to evaluate the reduction of uneven heating of its design and to determine the maximal permissible continuous current of the pantograph.

Keywords: pantograph head, cooling, heating, method of equivalent thermal substitution schemes, load current characteristic, traction current, maximal allowable long-term current, heat capacity, heat transfer.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-86-92

Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р, ведущее положение железных дорог определяется их возможностью перевозить основную часть потоков массовых грузов. К одной из проблем в сфере железнодорожного транспорта относится необходимость снятия ограничений для роста объемов транзитных грузовых перевозок. Среди решаемых Стратегией задач выделено снижение совокупных транспортных издержек, в том числе за счет повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта. Прогнозы по всем сценариям развития Стратегии указывают на значительный рост грузооборота и пассажирского потока поездов за счет увеличения массы составов и интенсивности их движения.

Особенность существующих электрифицированных железных дорог на территории России заключается в использовании системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,3 кВ, для которой в перспективе необходима передача токовой нагрузки свыше 3000 А. Сокращение издержек и рост

указанных в Стратегии эксплуатационных показателей требуют совершенствования системы токосъема в части нагрузочной способности токоприемника, характеризующей способность передачи максимально допустимых длительных токов без разрушения его токопроводящих и контактных элементов.

Несмотря на постоянное совершенствование конструкций полозов и применение новейших контактных вставок, повышенные токовые нагрузки приводят к увеличению износа контактных материалов и сокращению срока службы устройств токосъема. Особенно остро эта проблема проявляется при увеличении весовых норм поездов, интенсивности и возрастании скорости их движения.

Для оценки возможности передачи электрической энергии через скользящий сильноточный контакт требуются математические модели, позволяющие рассчитать нагрузочные характеристики типовых и модернизированных полозов токоприемников, в том числе оснащенных системами охлаждения.

Теоретические и экспериментальные исследования в области токосъема повышенных токовых нагрузок рассматриваются в работах [1–9] и др. Вместе с тем следует отметить, что математическая модель теплового состояния трехрядного полоза токоприемника в режиме движения, разработанная учеными ВНИИЖТ [3], не учитывает контактного сопротивления, которое служит источником наибольшего тепла. Трехмерная модель аналогичного полоза УрГУПС [8, 9] учитывает все резистивные сопротивления на пути протекания тягового тока, однако результаты расчетов соответствуют установившемуся режиму нагрева. Переходный процесс нагрева методом конечных элементов в течение 20 мин потребует значительных вычислительных мощностей. Кроме того, вышеуказанные модели соответствуют отечественному полюзу со стальным каркасом открытого типа, нагрузочная способность которого уступает существующей конструкции замкнутого типа из экструдированного алюминия.

Современный полюз токоприемника представляет собой самонесущую цельную контактную вставку (рис. 1), установленную на каркас посредством токопроводящего клея. Общая особенность совре-

менных полюзов состоит в применении алюминиевого закрытого профиля, внутренние полости которого обеспечивают несущую способность, крепление шунтов, работу пневматических каналов аварийно-опускающих устройств. Закрытая конструкция полюза каркаса, внутренние полости которого заполнены воздухом, снижает отвод тепла с нижней части вставки.



Рис. 1. Схема движения охлаждающих сред в отношении элемента вставки

В предлагаемой математической модели теплового состояния европолюза, разработанной в ОмГУПС на основании данных [5–7, 10, 11], учитывается распределенное воздействие контактных проводов на его верхние площадки [12]. Для

каждого элемента полюза 1–37 шириной 30 мм [13], изображенного на тепловой схеме замещения (рис. 2а), составляется уравнение теплового баланса, в котором источником тепла является тяговый ток в контактном сопротивлении и транзитный ток во вставке и в каркасе.

В тепловой схеме замещения полюза к элементам без тепловыделения относятся рога полюза 36, 37 и воздух 40–76 в полостях каркаса. Теплоотдача между твердыми элементами полюза осуществляется теплопроводностью, в окружающую среду — конвекцией и излучением, между полюзом и воздушным пространством в полостях — конвекцией.

Расчет переходного процесса нагрева полюза осуществляется методом эквивалентных тепловых схем замещения [14]. Основные допущения, принятые в расчетах, сводятся к следующему: положение контактного провода в плане соответствует равномерному закону распределения [12], рассчитываются средние температуры всех элементов токоприемника.

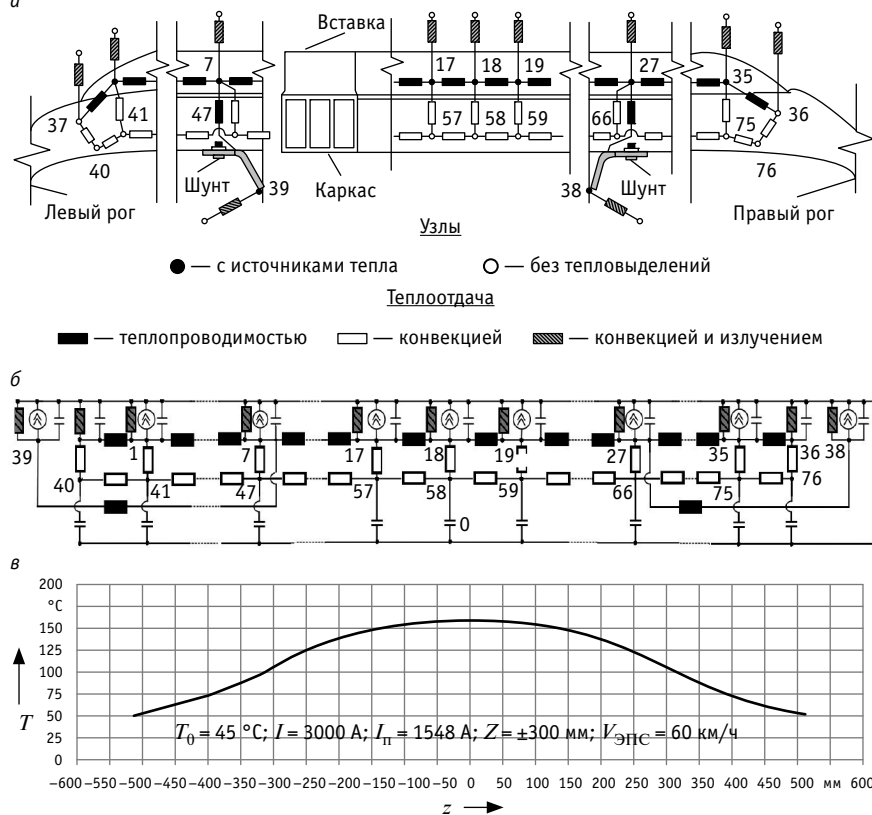


Рис. 2. Расчетная схема тепловых процессов типового европолюза токоприемника:

а — тепловая схема замещения полюза; б — электрическая схема замещения тепловых процессов; в — график распределения температуры полюза

С учетом вышеприведенных допущений уравнение теплового баланса имеет вид:
для i -го элемента рога без источника тепла

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-(\lambda_0 + \lambda_{ji}) \cdot T_i + \lambda_0 \cdot T_0 + \lambda_{ji} \cdot T_j}{C_i}, \quad (1)$$

для i -го элемента воздуха в полости каркаса

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-\lambda_{ji} \cdot T_i + \lambda_{ji} \cdot T_j}{C_i}, \quad (2)$$

для i -го токопроводящего элемента полоза с источником тепла

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-(\lambda_0 + \lambda_{i-1} + \lambda_{i+1}) \cdot T_i + \lambda_0 \cdot T_0 + \lambda_{i-1} \cdot T_{i-1} + \lambda_{i+1} \cdot T_{i+1} + \lambda_n \cdot T_n + P_i}{C_i}, \quad (3)$$

где λ_0 — в частности конвекция и излучение i -ми элементами полоза в окружающую среду.

Расчетные значения теплоемкости элементов полоза приняты долей от общей ее величины для всей конструкции. Теплоемкость и значения прочих основных теплофизических параметров полоза, в том числе теплопроводности, конвекции и излучения, приняты согласно данным работы [4]. Результаты расчета приведены для наиболее нагретого полоза, неравномерность распределения тягового тока токоприемника по полостям принята согласно соотношению $I_2/I_1 = 0,9$. Параметры окружающей среды приняты в расчетах как неблагоприятные с точки зрения тепловой нагрузки: температура $T_0 = 45^\circ\text{C}$, скорость электроподвижного состава $V_{\text{ЭПС}} = 60$ км/ч, скорость ветра $V_B = 0$.

Для схемы полоза на рис. 2а, согласно методу расчета, составлена электрическая схема замещения тепловых процессов (рис. 2б), на основании которой строится система из 76 уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_{01}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{01} + \lambda_{0137} + \lambda_{0102} + \lambda_{0141}) \cdot T_{01} + \lambda_{01} \cdot T_0 + \lambda_{0137} \cdot T_{37} + \lambda_{0102} \cdot T_{02} + \lambda_{0141} \cdot T_{41} + P_{01}}{C_{01}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{07}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{07} + \lambda_{0607} + \lambda_{0708} + \lambda_{0747} + \lambda_{0739}) \cdot T_{07} + \lambda_{07} \cdot T_0 + \lambda_{0607} \cdot T_{06} + \lambda_{0708} \cdot T_{08} + \lambda_{0747} \cdot T_{47} + \lambda_{0739} \cdot T_{39} + P_{07}}{C_{07}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{36}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{36} + \lambda_{3536} + \lambda_{3676}) \cdot T_{36} + \lambda_{36} \cdot T_0 + \lambda_{3536} \cdot T_{35} + \lambda_{3676} \cdot T_{76}}{C_{36}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{38}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{38} + \lambda_{2738}) \cdot T_{38} + \lambda_{38} \cdot T_0 + \lambda_{2738} \cdot T_{27} + P_{38}}{C_{38}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{76}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{7576} + \lambda_{3676}) \cdot T_{76} + \lambda_{375768} \cdot T_{75} + \lambda_{3676} \cdot T_{36}}{C_{76}}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где T_0 — температура окружающей среды;

T_i — температура i -го элемента полоза;

$C_{01}-C_{35}$ — теплоемкость i -х элементов полоза;

C_{36}, C_{37} — теплоемкость рогов;

C_{38}, C_{39} — теплоемкость шунтов;

$C_{40}-C_{76}$ — теплоемкость объемов воздуха в элементе каркаса полоза;

$P_{01}-P_{35}$ — мощность нагрева i -го элемента полоза;

$\lambda_{01}-\lambda_{39}$ — конвекция и излучение i -ми элементами полоза в окружающую среду;

$\lambda_{01j}-\lambda_{39j}$ — теплопроводность между рассматриваемым и соседним j -м элементами полоза ($i \neq j \leq 39$);

$\lambda_{3740}, \lambda_{0141}-\lambda_{3676}$ — конвекция между i -ми элементами полоза и j -ми объемами воздуха в каркасе;

$\lambda_{4041}-\lambda_{7576}$ — конвекция между i -ми элементами воздуха в полости каркаса.

Решение выполнено в программе Mathcad методом Рунге — Кутты четвертого порядка. Иллюстрация графика распределения температуры по полозу при токе токоприемника $I = 3000$ А представлена на рис. 2в.

Математическая модель теплового состояния полоза токоприемника в режиме движения позволяет рассчитывать переходные процессы его нагрева. Изменение температуры полоза для различных режимов потребления тягового тока показано на рис. 3, распределение установившихся значений температуры вдоль полоза — на рис. 4.

Время достижения установившейся температуры составляет 13 мин. Результаты расчета согласуются с экспериментальными исследованиями [4–6]. Максимальное значение температуры наблюдается в центре полоза, в связи с чем именно эту часть конструкции целесообразно охлаждать более интенсивно для снижения общей тепловой нагрузки полоза.

Предлагаемая конструкция полоза оснащается конфуззором (рис. 5а), подающим набегающий воздушный поток в центральную часть каркаса. Проходя внутри его полостей вдоль полоза, как показано на рис. 1, тепло отводится к краям полоза через рога [15].

В отличие от модели теплового состояния европолоза типовой конструк-

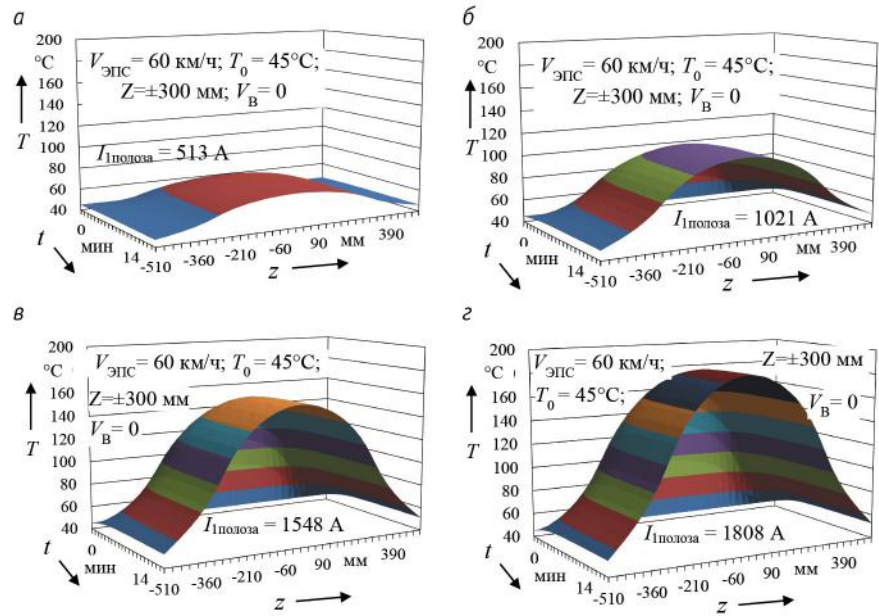


Рис. 3. Переходные режимы нагрева полоза при различных величинах тягового тока токоприемника: а — 1000 А; б — 2000 А; в — 3000 А; з — 3500 А

ции, движущийся воздух в каркасе может быть принят как элементы охлаждения без собственных теплоемкостей, поскольку он является частью окружающей среды, обладающей бесконечной теплоемкостью, с конвективной теплоотдачей между собой. При этом элемент воздуха в центральной части каркаса

имеет температуру окружающей среды с заданным значением $T_0 = 45$ °С. Таким образом, математическая модель теплового состояния усовершенствованного полоза при одном известном значении температуры состоит из 75 дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_{01}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{01} + \lambda_{0137} + \lambda_{0102} + \lambda_{0141}) \cdot T_{01} + \lambda_{01} \cdot T_0 + \lambda_{0137} \cdot T_{37} + \lambda_{0102} \cdot T_{02} + \lambda_{0141} \cdot T_{41} + P_{01}}{C_{01}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{07}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{07} + \lambda_{0607} + \lambda_{0708} + \lambda_{0747} + \lambda_{0739}) \cdot T_{07} + \lambda_{07} \cdot T_0 + \lambda_{0607} \cdot T_{06} + \lambda_{0708} \cdot T_{08} + \lambda_{0747} \cdot T_{47} + \lambda_{0739} \cdot T_{39} + P_{07}}{C_{07}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{18}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{18} + \lambda_{1718} + \lambda_{1819} + \lambda_{0018}) \cdot T_{18} + \lambda_{18} \cdot T_0 + \lambda_{1718} \cdot T_{17} + \lambda_{1819} \cdot T_{19} + \lambda_{0018} \cdot T_0 + P_{18}}{C_{18}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{36}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{36} + \lambda_{3536} + \lambda_{3675}) \cdot T_{36} + \lambda_{36} \cdot T_0 + \lambda_{3536} \cdot T_{35} + \lambda_{3675} \cdot T_{75}}{C_{36}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{38}}{dt} &= \frac{-(\lambda_{38} + \lambda_{2738}) \cdot T_{38} + \lambda_{38} \cdot T_0 + \lambda_{2738} \cdot T_{27} + P_{38}}{C_{38}}, \\ &\dots \\ \frac{dT_{75}}{dt} &= -(\lambda_{7475} + \lambda_{3675}) \cdot T_{75} + \lambda_{7475} \cdot T_{74} + \lambda_{3675} \cdot T_{36}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

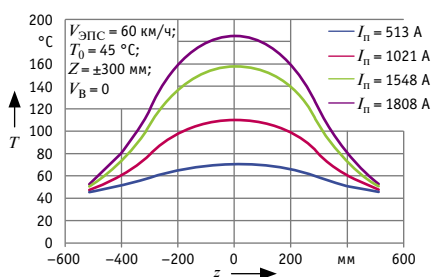


Рис. 4. Графики распределения установившегося значения температуры поверхности контактной вставки типовой конструкции при различных значениях тягового тока полоза

Результаты расчетов теплового состояния полоза с системой охлаждения для различных тяговых токов представлены парой графиков: на рис. 6а–9а приведено распределение температуры полоза токоприемника, на рис. 6б–9б — воздуха в каркасе. Как видно из этих рисунков, воздух в полостях полоза с конфуззором нагревается от центра к краям, а график температуры полоза более пологий в середине, что указывает на эффективность предлагаемой системы охлаждения. При увеличении тягового тока эффективность охлаждающего устройства возрастает.

Расчетные электрические характеристики ползцов токоприемника, определяющие максимально допустимое длительное значение тягового тока при движении, в соответствии с ГОСТ [13] приведены на рис. 10. Расчеты показывают, что применение системы охлаждения полоза снижает его максимальную температуру на 19,1 % при тяговом токе токоприемника 3000 А и на 20,3 % — при 3500 А. Для угольной контактной вставки предельное значение максимально допустимой температуры нагрева $T_{\max} = 200$ °С. Снижение температуры полоза позволяет осуществлять съем большей величины тягового тока на 32,4 %.

Преимущество разработанных математических моделей тепловых процессов ползцов состоит в возможности оценить характер распределения установившейся температуры по всей длине конструкции. Тогда вышеуказанные электрические характеристики могут быть представлены объемными графиками, подобными тем, что изображены на рис. 11 и 12.

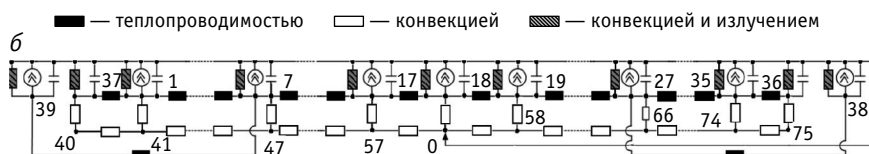
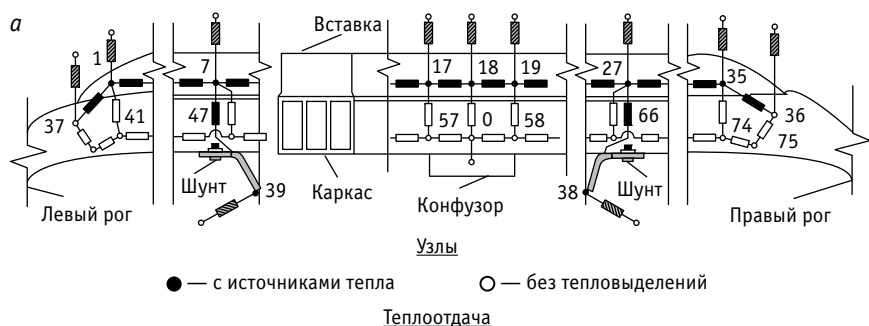


Рис. 5. Расчетная схема тепловых процессов полоза токоприемника:
а — тепловая схема замещения полоза; б — электрическая схема замещения тепловых процессов

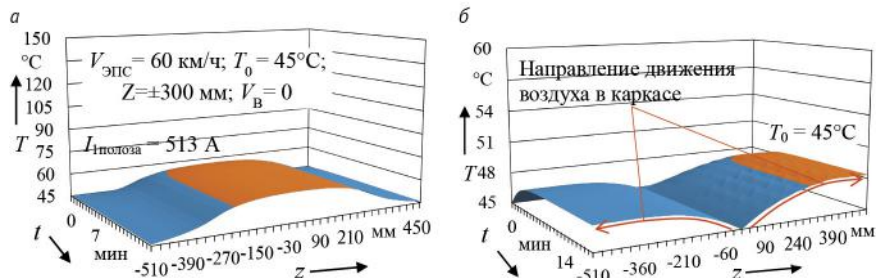


Рис. 6. Нагрев полоза (а) и воздуха (б) каркаса с устройством охлаждения при токе 1000 А

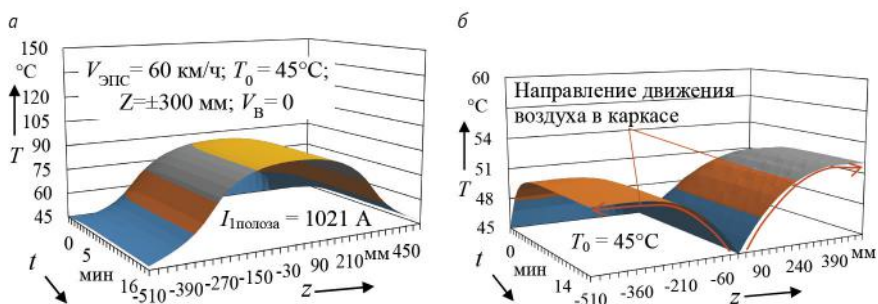


Рис. 7. Нагрев полоза (а) и воздуха (б) каркаса с устройством охлаждения при токе 2000 А

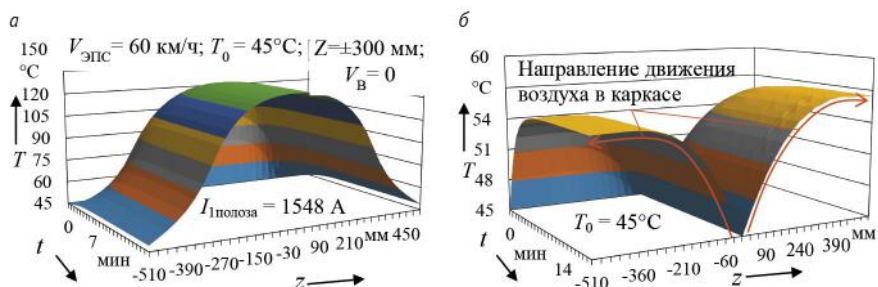


Рис. 8. Нагрев полоза (а) и воздуха (б) каркаса с устройством охлаждения при токе 3000 А

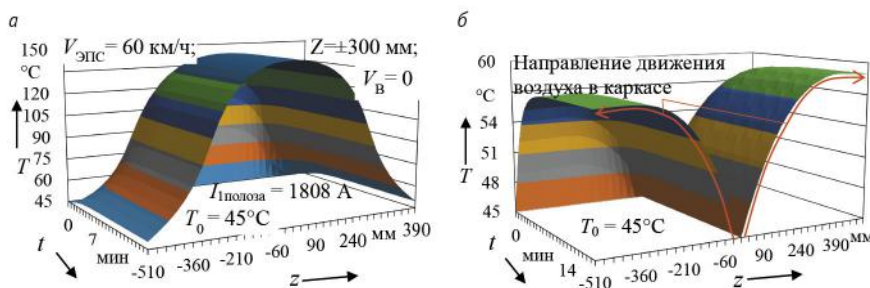


Рис. 9. Нагрев полоза (а) и воздуха (б) каркаса с устройством охлаждения при токе 3500 А

Такая форма представления результатов расчетов температуры наглядно показывает максимальные значения нагрева токопроводящих элементов полозов, степень неравномерности их нагрева по длине, эффективность предлагаемых систем охлаждения, в том числе при подаче охлаждающего воздуха в другие отличные от центра места, например по краям, вблизи кареток или точек крепления шунтов и систем аварийного опускания полоза, а также при применении охладителя, отличного от воздуха, в том числе имеющего жидкое агрегатное состояние или фазу.

Проверка адекватности предлагаемых математических моделей полозов осуществлена путем сравнения с результатами экспериментальных исследований на грузочных характеристиках токоприемника АХ 023 ВU LT фирмы Faiveley, оснащенного полозом PanTrac RH85 M8, проведенных в лаборатории ОмГУПС [7]. Графики установившихся значений температуры нагрева полозов приведены на рис. 13, переходного процесса для максимального режима 3200 А — на рис. 14. Сравнение экспериментально полученных значений с теоретическими показало, что их расхождение не превышает 2 %. В качестве критерия использовался коэффициент парной корреляции Пирсона.

Достоверность полученных результатов при сравнении экспериментальных и расчетных значений температуры нагрева полозов определена с помощью критерия Стьюдента. Величина критерия составляет не менее 95 % для $T_{эмп}(I = 1350 \text{ А}) = 0,87$, $T_{эмп}(I = 1680 \text{ А}) = 1,84$, $T_{эмп}(I = 1900 \text{ А}) = 0,59$, $T_{эмп}(I =$

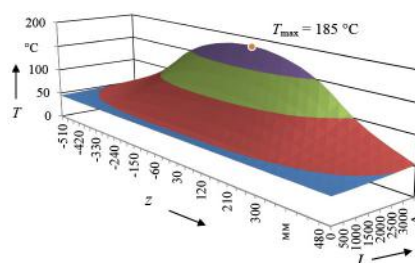


Рис. 11. График нагрева полоза типовой конструкции при различных значениях тягового тока токоприемника

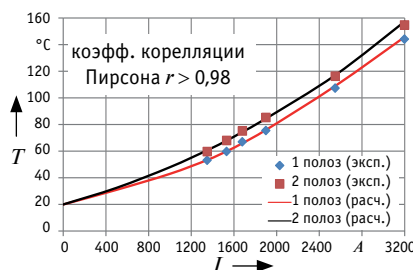


Рис. 13. Расчетные и экспериментальные нагрузочные характеристики полозов токоприемника

$= 2550 \text{ А}) = 1,01$ и $T_{эмп}(I = 3200 \text{ А}) = 0,134$ (см. рис. 14), меньших $t_{кр} = 1,962$.

Итак, разработанные математические модели теплового состояния полозов токоприемника на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения позволяют рассчитать переходный процесс нагрева элементов конструкции полоза, в том числе оснащенного системами охлаждения, в режиме движения. Расчеты и экспериментальные исследования указывают на эффективность предлагаемой

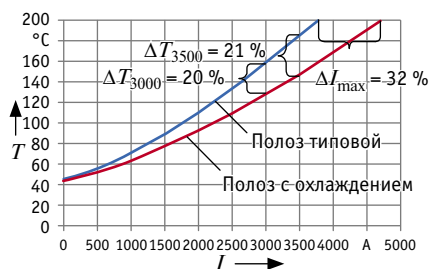


Рис. 10. Графики максимального нагрева полозов при различных значениях тягового тока токоприемника

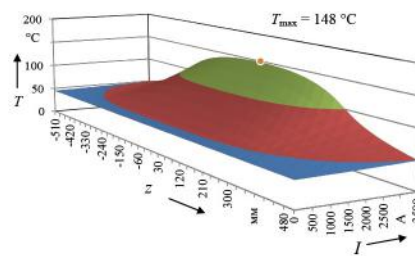


Рис. 12. График нагрева полоза, оснащенного системой охлаждения, при различных значениях тягового тока токоприемника

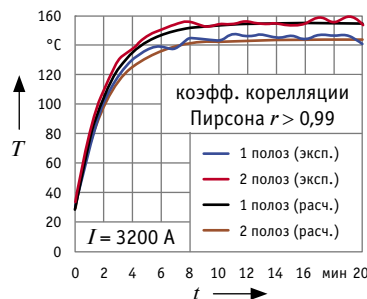


Рис. 14. Расчетные и экспериментальные графики нагрева полозов токоприемника

системы охлаждения полоза, представленная математическая модель позволяет оценить ее величину. Поскольку предлагаемая система охлаждения относится к пассивной [16], ее эффективность увеличивается с ростом скорости электроподвижного состава. Снижение температуры полоза позволяет осуществлять сьем величины тягового тока, большей на 19,7 %. Расхождение расчетных и экспериментальных результатов температуры нагрева не превышает 5 %.

Литература

1. Увеличение нагрузочной способности токоприемников / И. А. Беляев, Е. А. Вологин, Ю. Е. Купцов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1974. № 8. С. 51–54. ISSN 0044–4448.
2. Тюрнин П. Г., Миронос Н. В., Изергина М. Н. Экспериментальное определение токовой нагрузочной способности токоприемника // Токоосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе : сборник научных трудов ОАО «ВНИИЖТ». Москва : Интекст, 2010. С. 138–144.
3. Тартынский Д. В., Емельянова М. Н., Тибилов А. Т. Исследование износа контактных токоосъемных элементов на основе моделирования токораспределения в полозе токоприемника // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 2. С. 53–56. ISSN 2223–9731.
4. Смердин А. Н. Совершенствование системы токоосъема магистральных электрических железных дорог в условиях высокоскоростного и тяжеловесного движения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Омск, 2018. 600 с.
5. Смердин А. Н., Томилов В. В., Павлов В. М. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 99–110. ISSN 1815–9400.
6. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС24 и ЛАС 25 / В. М. Павлов, П. В. Попов, О. А. Сидоров, Томилов В. В. // Вестник ВЭЛНИИ. 2015. № 2 (70). С. 33–43. ISSN 1816–1928.
7. Исследования токовой нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава / В. М. Павлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 4. С. 19–24. ISSN 2223–9731.
8. Паранин А. В., Ефимов Д. А. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токоосъеме // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 81–84. ISSN 1815–9400.
9. Паранин А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 85–88. ISSN 1815–9400.
10. Токоосъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта / И. С. Гершман, Н. В. Миронос, М. А. Мельник, Е. И. Гершман // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 4. С. 3–10. ISSN 2223–9731.
11. Лоренз П. Графитные материалы и современные клееные вставки для токоприемников, снимающих большие токи : тезисы докладов седьмого Международного симпозиума Eltrans'2013 / ПГУПС. Санкт-Петербург, 2013. 63 с.
12. Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 43–53. ISSN 1815–9400.
13. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 24 с.
14. Томилов В. В., Тарасенко А. В., Куткин А. Н. Особенности теплового расчета токоприемников магистрального электроподвижного состава // Материалы шестого международного симпозиума Eltrans'2011 / ПГУПС. Санкт-Петербург, 2011. С. 526–536.
15. Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Системы охлаждения полоза токоприемника электроподвижного состава // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / ОмГУПС. Омск, 2020. С. 96–104.
16. Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Исследование систем охлаждения полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 66–75. ISSN 1815–9400.

References

1. Increase of bearing capacity of current collectors [Uvelichenie nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnikov] / I. A. Belyaev, E. A. Vologin, Yu. E. Kuptsov et al. // Railway Transport. 1974. No. 8. Pp. 51–54. ISSN 0044–4448.
2. Tyurnin P. G., Mironos N. V., Izergina M. N. Experimental determination of current bearing capacity of a current collector [Eksperimental'noe opredelenie tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnika] // Current collection and traction power supply of high-speed traffic on direct current : collection of research works of JSC VNIIZhT. Moscow : Intext, 2010. Pp. 138–144.
3. Tartynskiy D. V., Emelyanova M. N., Tibilov A. T. Research of running contacts wear based on simulation of current distribution in the pantograph slide [Issledovanie iznosa kontaktnykh tokos'emnykh elementov na osnove modelirovaniya tokoraspredeleniya v poloze tokopriemnika] // Vestnik VNIIZhT. 2015. No. 2. Pp. 53–56. ISSN 2223–9731.
4. Smerdin A. N. Development of current collection system of mainline electrified railways in conditions of high-speed and heavy load traffic [Sovershenstvovanie sistemy tokos'ema magistral'nykh elektricheskikh zheleznykh dorog v usloviyakh vysokoskorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya] : DSc in Engineering Thesis. Omsk, 2018. 600 p.
5. Smerdin A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement methods of checking of electrical duty indicators of rolling stocks pantographs [Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya nagruzochnykh pokazateley tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 3 (39). Pp. 99–110. ISSN 1815–9400.
6. Continuous current-carrying capacity test of TAs 24 and LAs 25 current-collectors [Proverka tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnikov TAs 24 i LAs 25] / V. M. Pavlov, P. V. Popov, O. A. Sidorov, Tomilov V. V. // Vestnik VELNI. 2015. No. 2 (70). Pp. 33–43. ISSN 1816–1928.
7. Current-loading capacity investigations of current collector operated with mainline electric motive power [Issledovaniya tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] / V. M. Pavlov, O. A. Sidorov, A. N. Smerdin et al. // Vestnik VNIIZhT. 2015. No. 4. Pp. 19–24. ISSN 2223–9731.
8. Paraniin A. V., Yefimov D. A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner and current pickup [Raschet raspredeleniya toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokos'eme] // Transport of the Urals. 2009. No. 4 (23). Pp. 81–84. ISSN 1815–9400.
9. Paraniin A. V. Mathematical modeling of thermal processes at interaction of a current collector and a contact wire [Matematicheskoe modelirovaniye teplovykh protsessov pri vzaimodeystvii tokopriemnika i kontaktnogo provoda] // Transport of the Urals. 2009. No. 4 (23). Pp. 85–88. ISSN 1815–9400.
10. Current-collecting inserts for current collection of railway transport [Tokos'emnye vstavki dlya tokopriemnikov zheleznodorozhnogo transporta] / I. S. Gershtman, N. V. Mironos, M. A. Melnik, E. I. Gershtman // Vestnik VNIIZhT. 2012. No. 4. Pp. 3–10. ISSN 2223–9731.
11. Lorenz P. Graphite materials and modern glued inserts for current collectors that collect high currents [Grafitnye materialy i sovremennyye kleenyye vstavki dlya tokopriemnikov, snimayushchikh bol'shie toki] : scientific abstracts of the 7th International Symposium Eltrans'2013 / PSTU. St. Petersburg, 2013. 63 p.
12. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Method for the heat state calculating of pantograph head of a mainline electric rolling stock taking account the contact wire zigzag [Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya poloza tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava s uchetom izmeneniya polozheniya kontaktnogo provoda v plane] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 4 (40). Pp. 43–53. ISSN 1815–9400.
13. GOST 32204–2013. Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications [Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchye tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 24 p.
14. Tomilov V. V., Tarasenko A. V., Kutkin A. N. Peculiarities of thermal calculation of current collectors of mainline electric rolling stock [Osobennosti teplovogo rascheta tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Proceedings of the 6th International Symposium Eltrans'2011 / PSTU. St. Petersburg, 2011. Pp. 526–536.
15. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. System for cooling a collection head of electric rolling stock [Sistemy okhlazhdeniya poloza tokopriemnika elektropodvizhnogo sostava] // Innovative projects and technologies in education, manufacturing and transport : proceedings of the scientific conference / OSTU. Omsk, 2020. Pp. 96–104.
16. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Research of cooling system for pantograph head of electric train [Issledovanie sistem okhlazhdeniya poloza tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 2 (38). Pp. 66–75. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,84 авторских листа

УДК 621.332.33(043)

Олеся Андреевна Лукьянова, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Александр Владимирович Тарасенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Иван Евгеньевич Чертков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ КОНСОЛЕЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Olesya Andreevna Lukyanova, Lecturer, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Alexander Vladimirovich Tarasenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Ivan Evgenyevich Chertkov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Development of methods for testing catenary cantilevers

Аннотация

Консоли контактной сети — ключевые устройства, обеспечивающие пространственное положение проводов контактной подвески. Они определяют ее параметры и показатели, для повышения точности расчета которых требуется учитывать максимальное количество факторов, влияющих на работу консолей в условиях эксплуатации. В статье сделан обзор методов испытаний консолей контактной сети, рассмотрены методики и устройства, предназначенные для исследования трения в узлах крепления консолей, в том числе с учетом температуры окружающей среды. Предложена усовершенствованная методика расчета параметров контактной подвески, разработанная по результатам экспериментальных исследований, использование которой позволит повысить точность регулировки проводов и тросов.

Ключевые слова: контактная сеть, натяжение несущего троса, консоль, узел крепления, сила трения, климатические испытания, термоизолирующий кожух.

Summary

Catenary cantilevers are key devices that maintain the spatial position of catenary suspension wires. They determine the catenary parameters and indicators, increase of the calculation accuracy of which requires the consideration for maximum number of factors that affect the work of cantilevers in conditions of operation. The paper includes the overview of methods for testing catenary cantilevers and considers methods and devices for studying friction in cantilever connection joints, including those that consider environment temperature. As a result, the authors propose an improved method of calculation of catenary suspension parameters that is developed on the basis of experimental research results, the use of which will increase the accuracy of adjustment of wires and ropes.

Keywords: catenary, pull of bearing rope, cantilever, connection joint, friction force, climatic tests, thermal insulation case.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-93-97

Контактная сеть, представляя собой часть железнодорожной тяговой сети, обеспечивает передачу электроэнергии электроподвижному составу и в общем случае состоит из большого числа устройств — контактирующих, канализирующих ток, секционирующих, питающих, опорно-поддерживающих, изолирующих, защитных и диагностических.

Анализ эксплуатационной работы контактной сети ОАО «Российские железные дороги» [1] показал, что число отказов ее устройств продолжает оставаться на достаточно высоком уровне (рис. 1). При этом значительная доля отказов приходится на контактирующие и канализирующие ток устройства, а также на опорно-поддерживающие и изолирующие, что отрицательно сказывается на надежности работы контактной сети в целом.

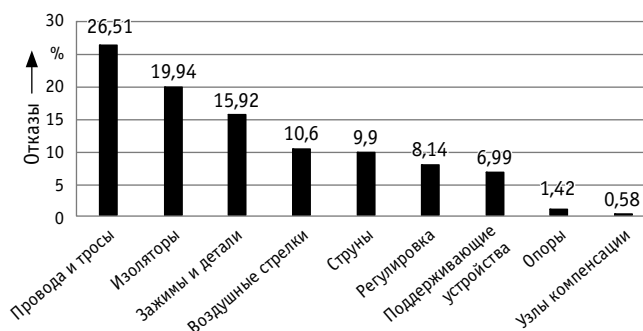


Рис. 1. Отказы устройств контактной сети за 2002–2017 гг.

В то же время анализ отказов непосредственно поддерживающих устройств (консолей, гибких и жестких поперечин, траверс и др.) за период с 2002 по 2017 г. (рис. 2) показал, что их количество снизилось в результате проводимой

в последние годы модернизации контактной сети с заменой поддерживающих устройств. Это объясняется тем, что по статистике наименьшее количество отказов приходится на первые годы эксплуатации вновь построенных или реконструированных участков контактной сети, на которых установлены консоли современных конструкций.

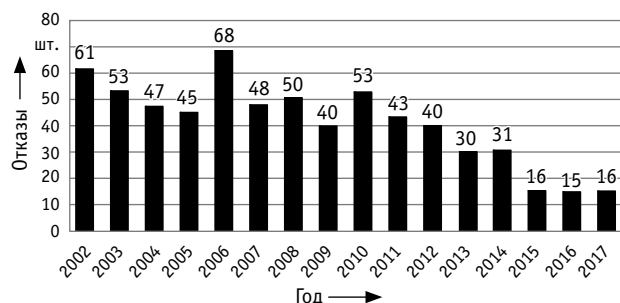


Рис. 2. Отказы поддерживающих устройств контактной сети

Наряду с опорами, составляющими основную часть в подсистеме опорно-поддерживающих устройств, консоли оказывают существенное влияние на расположение в пространстве проводов контактной подвески одного или нескольких железнодорожных путей.

Основное назначение консолей заключается в обеспечении заданного положения контактной подвески в пространстве, а также в регулировании положения несущего троса и контактного провода в плане и профиле, их продольного перемещения и изменения положения контактного провода относительно оси пути при температурных перемещениях в допустимых пределах. Кроме того, механические соединения элементов консолей обеспечивают протекание тока короткого замыкания при пробое или перекрытии изоляторов без повреждения элементов консоли [2].

При эксплуатации наклон опор вдоль и поперек оси пути, вызванный различными факторами, вызывает смещение поворотных узлов крепления консолей к опоре от вертикального положения и, как следствие, увеличение сил трения в этих узлах, что затрудняет поворот консолей при перемещении несущего троса вдоль оси пути и приводит к изменению его натяжения в пролете и по длине анкерного участка (вплоть до недопустимых значений). Заклинивание консоли может стать причиной возникновения дефектов (неисправностей) деталей и узлов контактной сети, несовместимых с условиями эксплуатации, вплоть до отказа всего анкерного участка.

Выбор конструкции консолей из типовых проектных решений определяется в основном условиями установки опор, но в отдельных случаях все же возникает необходимость расчета устройства для определения геометрических размеров консолей с учетом наличия или отсутствия фиксаторных стоек [3, 4].

В процессе проектирования консолей для оценки максимальных значений расчетных нагрузок в их основных сочетаниях рассматривают режимы работы контактной сети при гололеде с ветром и ветре максимальной интенсивности (направление ветра принимают таким, при котором создаются неблагоприятные условия для работы элементов консоли),

а в отдельных случаях — режим минимальной температуры. При расчетах консолей контактной сети учитываются вертикальные (силы тяжести консоли, контактной подвески, поддерживающего изолятора, фиксатора, гололеда на консоли и проводах) и горизонтальные (давление ветра на провода, усилие от изменения направления проводов на кривой на отводах) виды нагрузок. Для всех консолей выполняют проверку на действие «монтажных» и особых нагрузок, возникающих при обрыве несущего троса и контактных проводов.

Для проверки на прочность и устойчивость элементов консолей проводят поверочные расчеты, включающие определение размеров сечений стержней консолей, а также расчеты по предельным состояниям, учитывающие наличие шарнирного закрепления.

Поверочные расчеты для консолей по первому предельному состоянию выполняют следующим образом:

- кронштейн консоли проверяют на совместное действие изгиба и растяжения/сжатия в месте крепления тяги;
- кронштейн и тягу консоли проверяют на совместное действие изгиба и сжатия в месте действия максимального момента, учитывая влияние эксцентриситета приложения продольных сил, обусловленных конструкцией фиксатора и тяги;
- сжатый участок кронштейна проверяют на устойчивость путем определения коэффициента устойчивости;
- тягу проверяют на растяжение;
- подкосы консолей, на которых предусматривается крепление фиксаторов или фиксаторных стоек, проверяют по второму предельному состоянию по деформациям (предельному прогибу).

Указанные расчеты позволяют определить наибольшие из возможных значений изгибающего момента, растягивающего и сжимающего усилий, действующих на консоли контактной сети [3].

Общий недостаток существующих методик расчета консолей заключается в том, что они не учитывают влияние таких факторов, как моменты сил трения в узлах крепления консолей, а также направление и угол наклона опоры, которые оказывают значительное влияние на работу консолей и пространственное положение проводов и тросов контактной подвески, а следовательно, на ее параметры.

Для определения опорных реакций, влияющих на момент сил трения в узлах крепления консоли, используется расчетная схема (рис. 3а), подробно описанная в статье [5]. В процессе исследований выявлена зависимость величины момента сил трения от нагрузок, прикладываемых к элементам консоли.

Изменение натяжения несущего троса ΔT (рис. 3б) является результатом действия момента сил трения $M_{тр}$ в узлах крепления консоли и передается в точку крепления несущего троса:

$$\Delta T = M_{тр} / (l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}).$$

При наклоне опоры момент сил трения изменяется в зависимости от направления действия опорных реакций в узлах крепления консоли, при этом внешние нагрузки, действующие на консоль со стороны контактной подвески, выбираются и рассчитываются в соответствии с типом последней.

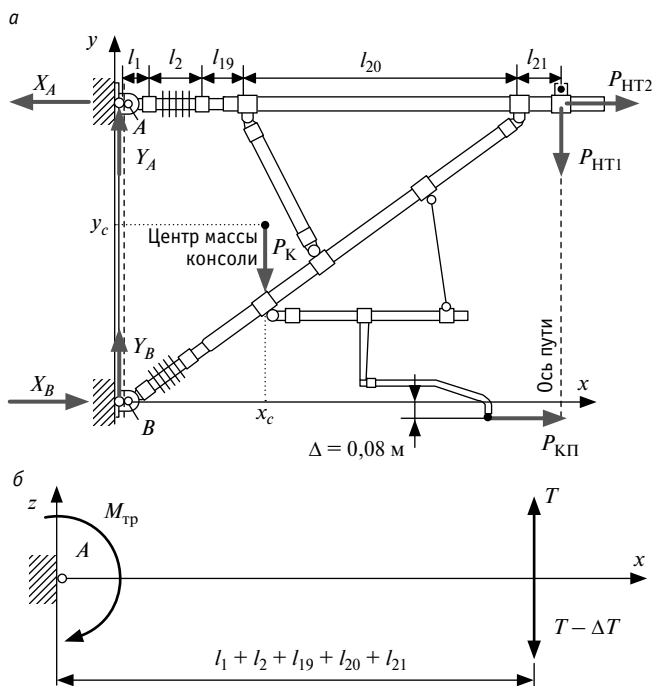


Рис. 3. Расчетные схемы для определения опорных реакций (а) и изменения натяжения (б) несущего троса:

X_A, X_B — радиальные опорные реакции в верхнем и нижнем узлах крепления соответственно; Y_A, Y_B — осевые опорные реакции; P_K — вес консоли; $P_{КП}$ — нагрузка от зигзага контактного провода; P_{HT1}, P_{HT2} — вертикальная и горизонтальная нагрузки от несущего троса соответственно

Определение оптимальных конструкций консолей исключительно расчетным путем является недостаточно точным, поэтому дополнительно проводят натурные испытания (рис. 4), проверяя характеристики консолей на соответствие требованиям нормативно-технической документации. Испытания проводят при разработке и изготовлении консолей, как правило, для нормальных климатических условий [2, 6], однако создание иных условий тоже возможно, если это оговорено в конкретных видах испытаний.

Поскольку на консоли в процессе эксплуатации воздействуют постоянные и временные нагрузки, при испытаниях необходимо определять механическую прочность консоли в сборе (рис. 5) [6].

Нагружение консоли проводят плавно на ступенях допускаемой, испытательной и разрушающей нагрузки с выдержкой времени в течение 1 мин, при этом замеряют прогибы в точках приложения нагрузки. Консоли считают выдержавшими испытания, если относительная величина прогиба не превышает значения, указанные в нормативной документации.

Анализ видов и методик испытаний показал, что влияние различных факторов на трение в узлах крепления консолей не исследуют. Поэтому, чтобы определить моменты сил трения в узлах крепления консоли контактной сети в условиях ее эксплуатации и учесть трение при расчете параметров контактной подвески, на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета



Рис. 4. Классификация видов испытаний консолей

путей сообщения разработаны методика и устройство для проведения широкого спектра испытаний различных типов консолей. Полученные результаты подтверждают влияние эксплуатационных факторов на моменты сил трения в узлах крепления консолей, а также на параметры и показатели контактной подвески [7–9].

Для оценки влияния температуры окружающей среды на трение в узлах крепления консолей и на их работоспособность предложенные методика и устройство были усовершенствованы. В частности, устройство для исследования трения в узлах крепления консоли (рис. 6), состоящее из консоли, закрепленной на опоре, устройств нагружения, измерительного и возвратного блоков, дополнено климатической системой с блоком управления [9].

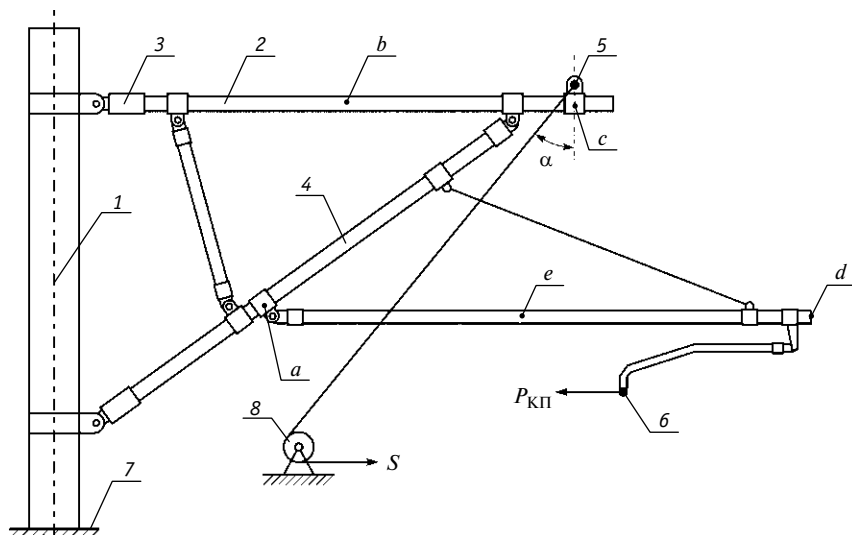


Рис. 5. Схема для испытания консоли в сборе:

1 — опорная стойка; 2 — горизонтальный элемент консоли; 3 — фитинги консолей;
4 — подкос консоли; 5 — несущий трос; 6 — контактный провод; 7 — фундамент;
8 — ролик; *a, b, c, d, e* — точки измерения прогиба элементов консолей;
 $P_{КП}$, S — прикладываемые нагрузки; α — угол приложения нагрузки S

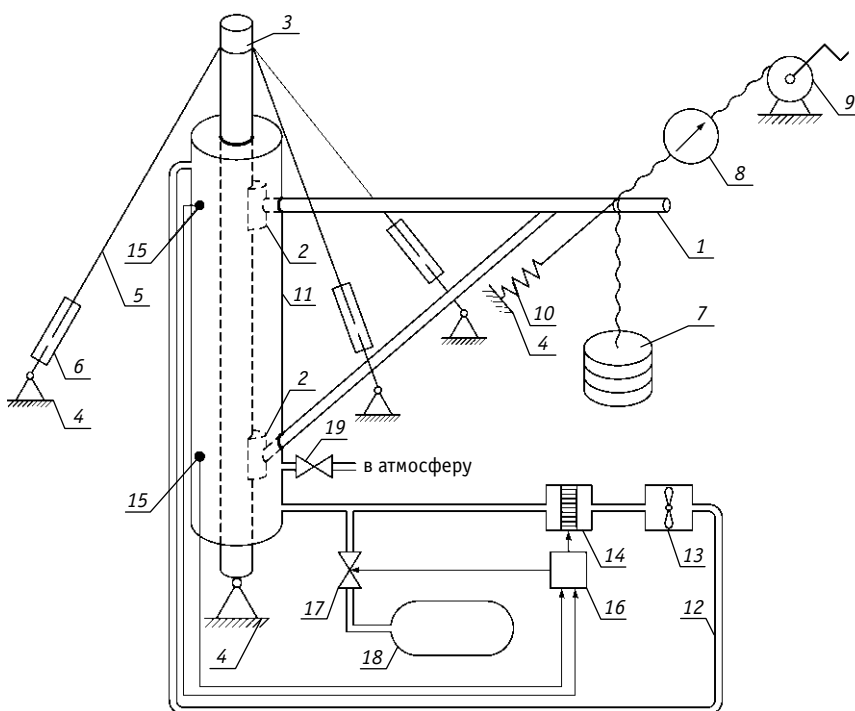


Рис. 6. Схема устройства для исследования трения в узлах крепления консоли при различной температуре окружающей среды

Перед началом исследований опора 3 с помощью оттяжек 5 устанавливается в вертикальное положение. Конструкция консоли 1 и узлы ее крепления 2 могут быть различными в зависимости от типа исследуемой контактной подвески. Мас-

са грузов 7 в блоке имитации веса контактной подвески принимается в зависимости от ее типа.

Узлы крепления консоли размещаются в герметичном термоизолирующем кожухе 11, его полость соединена

с пневмомагистралью 12, образующей замкнутый контур, в котором для циркуляции воздуха используется вентилятор 13. Для исследования влияния высоких температур (до +50 °С) окружающего воздуха на трение в узлах крепления консоли предназначен нагревательный элемент 14, включение и отключение которого осуществляется блоком управления 16, а для исследования влияния низких температур (до -50 °С) окружающего воздуха — источник хладагента 18, подаваемого в пневмомагистраль с помощью запорно-пускового устройства 17, открытие и закрытие которого осуществляется блоком управления. Температура воздуха внутри термоизолирующего кожуха контролируется двумя датчиками температуры 15, установленными на уровне узлов крепления консоли и связанными с блоком управления.

При исследовании влияния различных температур окружающего воздуха определение трения в узлах крепления начинается с установки консоли в положение, перпендикулярное относительно предполагаемой оси пути. Требуемая температура воздуха в термоизолирующем кожухе устанавливается включением либо нагревательного элемента, либо открытием запорно-пускового устройства, которое подает хладагент в пневмомагистраль, и вентилятора, обеспечивающего циркуляцию воздуха по замкнутому контуру. Лебедкой 9 осуществляется плавный поворот консоли сначала в одном направлении, потом в обратном с помощью возвратной пружины 10. При этом фиксируются прикладываемые усилия (динамометром 8), а также перемещения места крепления несущего троса на консоли (например, с помощью отвеса и измерительной шкалы), по которым расчетным путем определяется сила сухого трения в узлах крепления консоли.

Аналогичным образом определяются силы трения в узлах крепления консоли при наклоне опоры контактной сети, который задается с помощью закрепленных на ней оттяжек, соединенных посредством винтовых стяжек 6 с основанием 4.

Клапан 19 используется для выпуска в атмосферу воздуха из полости термоизолирующего кожуха по окончании испытаний, а также для уменьшения избыточного давления в нем.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

анализ эксплуатационной работы контактной сети позволил выделить ряд проблем, для решения которых необходимы дополнительные исследования консолей контактной сети;

для повышения точности определения параметров контактной подвески необходимо использовать предлагаемую методику расчета изменения натяжения несущего троса по длине анкерного участка, которая учитывает конструкции консолей и условия их эксплуатации;

анализ методик и устройств испытаний показал, что они не дают возможность исследовать ни трение в узлах крепления консолей, ни влияние на него различных факторов, в том числе температуры воздуха;

предлагаемое устройство позволяет исследовать влияние высоких и низких температур окружающей среды на трение в узлах крепления консоли, возникающее в процессе эксплуатации, а следовательно, подтвердить достоверность технических расчетов параметров контактной подвески и повысить точность регулировки ее проводов и тросов.

Литература

1. Лукьянова О. А. Повышение эффективности эксплуатации контактной сети за счет совершенствования узлов крепления консолей к опорам : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2020. 173 с.
2. ГОСТ 32679–2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. Москва : Стандартинформ, 2015. 16 с.
3. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. Москва : Транспорт, 1991. 335 с.
4. СТН ЦЭ 141–99. Нормы проектирования контактной сети. Москва : Трансиздат, 2001. 176 с.
5. Лукьянова О. А., Заренков С. В., Салая И. Л. Исследование влияния силы сухого трения в узлах крепления поворотных консолей на изменение натяжения по длине анкерного участка электрифицированной железнодорожной магистрали // Известия Транссиба. 2017. № 4 (32). С. 88–101. ISSN 2220–4245.
6. ПНСТ-2014. Консоли из композиционных материалов для контактной сети железных дорог. Методы испытаний. Москва : Стандартинформ, 2014. 15 с.
7. Лукьянова О. А., Тарасенко А. В., Чертков И. Е. Улучшение параметров контактной подвески за счет совершенствования элементов крепления консоли к опоре // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-86-90. ISSN 1815–9400.
8. Устройство для исследования трения в узлах крепления консоли / О. А. Сидоров, О. А. Лукьянова, И. Е. Чертков [и др.] : патент 2687310 Российская Федерация. № 2018126437 ; заявл. 17.07.18 ; опубл. 13.05.19, Бюл. № 21.
9. Устройство для исследования трения в узлах крепления консоли / О. А. Сидоров, О. А. Лукьянова, И. Е. Чертков [и др.] : патент 2715363 Российская Федерация. № 2019122376 ; заявл. 12.07.19 ; опубл. 26.02.20, Бюл. № 6.

References

1. Lukyanova O. A. Increase of operation efficiency of catenary by modernization of cantilever connection joints [Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii kontaktnoy seti za schet sovershenstvovaniya uzlov krepleniya konsoley k oporam] : PhD in Engineering Thesis. Omsk, 2020. 173 p.
2. GOST 32679–2014. Contact line for railway. Technical requirements and control methods [Kontaktnaya set` zheleznoy dorogi. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya]. Moscow : Standardinform, 2015. 16 p.
3. Frayfeld A. V., Brod G. N. Designing the contact network [Proektirovanie kontaktnoy seti]. Moscow : Transport, 1991. 335 p.
4. STN TsE 141–99. Catenary design code [Normy proektirovaniya kontaktnoy seti]. Moscow : Transizdat, 2001. 176 p.
5. Lukyanova O. A., Zarenkov S. V., Salya I. L. Investigation of the dry friction power influence in the units of the mounting convoys on the change of anchor site length tension of the electrified railway [Issledovanie vliyaniya sily sukhogo treniya v uzлах krepleniya povorotnykh konsoley na izmenenie natyazheniya po dline ankernogo uchastka elektrifitsirovannoy zheleznodorozhnoy magistrali] // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. No. 4 (32). Pp. 88–101. ISSN 2220–4245.
6. PNST-2014. Console from composite materials for catenary of railways. Test methods [Konsoli iz kompozitsionnykh materialov dlya kontaktnoy seti zheleznykh dorog. Metody ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 15 p.
7. Lukyanova O. A., Tarasenko A. V., Chertkov I. E. Enhancement of catenary suspension parameters by improving elements of mounting cantilever to pole [Uluchshenie parametrov kontaktnoy podveski za schet sovershenstvovaniya elementov krepleniya konsoli k opore] // Transport of the Urals. 2019. No. 2 (61). Pp. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-86-90. ISSN 1815–9400.
8. Device for studying friction in cantilever connection joints [Ustroystvo dlya issledovaniya treniya v uzлах krepleniya konsoli] / O. A. Sidorov, O. A. Lukyanova, I. E. Chertkov et al. : patent 2687310 Russian Federation. No. 2018126437 ; filed 17.07.18 ; publ. 13.05.19, Bulletin No. 21.
9. Device for studying friction in cantilever connection joints [Ustroystvo dlya issledovaniya treniya v uzлах krepleniya konsoli] / O. A. Sidorov, O. A. Lukyanova, I. E. Chertkov et al. : patent 2715363 Russian Federation. No. 2019122376 ; filed 12.07.19 ; publ. 26.02.20, Bulletin No. 6.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 625-1/-3

Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Владимирович Окунев, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Ваноевич Микава, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Никита Васильевич Крапивин, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ТРЕБОВАНИЯ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НЕСУЩЕГО И КОНТАКТНОГО ПРОВОДА

Alexey Anatolyevich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Vladimirovich Okunev, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Vanoevich Mikava, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikita Vasilyevich Krapivin, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Requirements to assessment of reliability of supporting constructions for bearing and contact wires

Аннотация

К контактной подвеске электрифицированных железных дорог на всех этапах ее жизненного цикла предъявляются повышенные требования. Большое влияние на ее работу оказывают поддерживающие конструкции. В статье дан анализ работы поддерживающих конструкций, таких как опоры контактной сети, консоли и фиксаторы. Доказана необходимость применять специальную методику расчета показателей надежности, что позволит в дальнейшем выстроить грамотную систему технического обслуживания участка контактной сети.

Ключевые слова: контактная сеть, поддерживающие конструкции, жизненный цикл, несущий провод, контактный провод.

Summary

Increased requirements are set to catenary suspension of electrified railways on all stages of life cycle. Big influence on its correct operation is rendered by supporting constructions. The paper presents an analysis of operation of supporting constructions such as catenary poles, cantilevers and pull-offs. As a result, the authors proved the necessity to apply a special method for calculation of reliability parameters, which will allow creating an accurate system of catenary section maintenance.

Keywords: catenary, supporting constructions, life cycle, bearing wire, contact wire.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-98-102

С самого начала электрификации железных дорог повышенное внимание уделялось контактной подвеске. Главная особенность контактной подвески — разное расположение контактного провода и несущего троса в плане пути, от чего зависит ее работа в различных климатических условиях, а также требования к ее техническому обслуживанию и эксплуатации. Для поддержания проводов контактной подвески используется система, состоящая из опоры контактной сети, консоли несущего троса и фиксатора контактного провода. Каждый из этих элементов имеет свои особенности эксплуатации, но в целом вся система влияет на качество токосъема.

Рассмотрим опоры контактной сети. В ходе анализа их надежности был выявлен ряд основных проблем, возникающих при эксплуатации, и определены приоритетные задачи по снижению рисков отказа опорных конструкций. Помимо этого разработана подробная классификация проблем и причин возникновения отказов железобетонных опор контактной сети.

Центрифугированная железобетонная опора ввиду сложности своей конструкции достаточно сильно подвержена трещинообразованию под воздействием температурных изменений. Установлено, что в центрифугированных опорах могут создаваться перепады температур до 12–14 °С в утренние часы. К полудню эти перепады сглаживаются, а в вечерние часы температура воздуха внутри опор оказывается теплее температуры наружного воздуха [1]. Так как прочность бетона зависит

от величины, определяющей соотношение сжимающих и растягивающих напряжений, при неравномерности этих соотношений происходит разрушение бетона [1].

Нестационарные тепловые режимы вызывают соответствующие изменения напряжений в течение суток [1]. Доказано, что чем больше перепады температуры окружающей среды, тем больше возникают растягивающие напряжения, что становится причиной снижения трещиностойкости железобетонных опор.

Температурные колебания приводят к трещинообразованию бетонного слоя различной степени дефектности. Например, в течение 2018 г. было выявлено 505 дефектных опор контактной сети на участках Свердловской железной дороги. В результате проведенных мероприятий:

141 опора заменена с переводом нагрузки;

389 опор выведены из категории дефектных после ремонта («лечения»);

222 опоры выведены из категории дефектных по актам после дополнительного обследования.

Таким образом, на начало 2019 г. в эксплуатации находилось 3536 дефектных опор контактной сети (рис. 1).

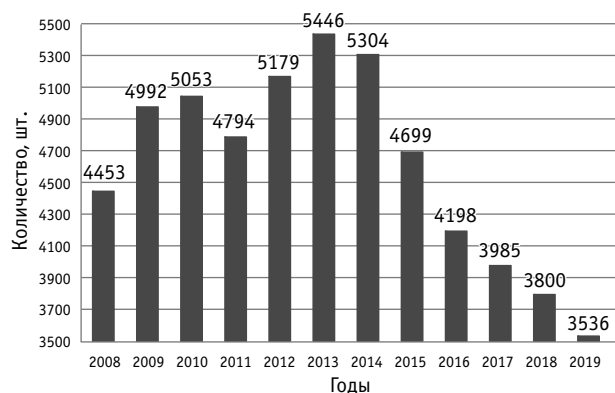


Рис. 1. Динамика изменения количества дефектных опор

Из рис. 1 следует, что в хозяйстве электрификации наблюдается стабильная динамика снижения количества дефектных опор.

Классификация по типам опор показала, что наибольшее число дефектных составляют железобетонные типов СКУ (1088 шт.), ЖБК (612 шт.) и металлические типа М (502 шт.).

Одним из основных факторов, которые приводят к снижению срока службы опор контактной сети, являются штормовые порывы ветра. Не исключены и прямые попадания грозных разрядов в опоры, расположенные на открытых насыпях, при отсутствии соответствующих молниеотводов.

Для решения проблемы, связанной с влиянием метеофакторов, в которых эксплуатируются железобетонные опоры контактной сети, требуется не только совершенствовать конструктивную часть самих опор, чтобы компенсировать температурные колебания, но и разрабатывать технические мероприятия, обеспечивающие сохранность опор при различных погодных условиях.

Описанные выше мероприятия показывают достаточно стабильную статистику снижения количества опор различной сте-

пени дефектности (см. рис. 1), но при этом нельзя не заметить, что в основном они не направлены на устранение самих дефектов. Поскольку появление трещин в бетонном слое приводит к коррозии металла, а значит, к снижению несущей способности, применяемые способы «лечения» позволяют лишь замедлить скорость ее протекания. Соответственно опоры, подвергнутые «лечению», сложно считать бездефектными, так как в данном случае снижается лишь степень дефектности [1, 2].

Остановимся на проблемах эксплуатации контактной подвески и ее разрегулировки, причиной которых стала неправильная работа консолей и фиксаторов.

Так, в 2015 г. зафиксировано 98 случаев отказов контактной сети из-за неудовлетворительной регулировки (13 % от общего количества). Наибольшее число отказов зафиксировано на Северо-Кавказской (15 случаев), Забайкальской (11) и Московской (10) железных дорогах. В результате корректирующих мер в 2015 г. выполнена ревизия и регулировка контактной подвески в объеме 44,2 тыс. км на главных путях перегонов и станций, проведена верховая диагностика 42,9 тыс. км контактной подвески на главных путях.

Установлено, что неудовлетворительное состояние контактной подвески обусловлено недостаточно полной и правильной с технической точки зрения диагностикой. На статические параметры контактной подвески — высоту контактного провода от уровня головки рельса (УГР) и разницу высот контактного провода от УГР на смежных опорах в опорных узлах — влияют отсутствие новых методик по совершенствованию технического обслуживания и ошибки, допущенные при проведении работ по установке опорных и поддерживающих конструкций.

Одними из главных причин нарушения стабильной работы устройств и элементов контактной сети в 2014 г. продолжали оставаться обрывы и пережоги проводов — 84 случая, или 11 % от общего количества. Среди них на Куйбышевской железной дороге зафиксировано 12 случаев, на Свердловской — 11, на Московской и Северо-Кавказской — по 10. Из общего количества обрывов и пережогов проводов контактной сети на контактные провода приходилось 59 % случаев, на несущие тросы — 28 %, на усиливающие провода — 13 %.

Пережоги и, как следствие, обрывы контактных проводов происходят из-за некачественного токосъема. Отрыв токоприемника от контактного провода и потеря контакта случаются довольно часто, что приводит к появлению электрической дуги и перегреву контактного провода. Проведение монтажных работ в соответствии с утвержденной проектной документацией позволяет снизить количество отказов контактного провода, а контроль контактного провода ультразвуком — вовремя диагностировать и предупредить дальнейшее развитие неисправного состояния [3, 4].

При исследовании работы арматуры контактной сети в 2014 г. выявлено 72 случая отказа контактной сети из-за разрушения зажимов (10 % от общего количества). Наиболее часто повреждаемыми остаются зажимы КС-049 — 24 случая (33 % от общего количества повреждений) и КС-046 — 16 случаев (22 %). Выход из строя зажимов является следствием неправильной установки в проектное положение поддерживающих конструкций (консолей контактной сети), что приводит

к последующей разрегулировке контактной подвески. Наибольшее количество отказов выявлено на Забайкальской и Горьковской железных дорогах. В течение года было зафиксировано три случая отказов зажимов типа КС-321, все повреждения произошли из-за нарушения технологии при их установке на контактном проводе.

Одним из малонадежных узлов контактной сети продолжают оставаться воздушные стрелки [2]. В 2014 г. из 68 случаев отказов в 57 (83 %) воздушные стрелки не были оборудованы устройством одновременного подъема проводов. Это подтверждает, что устройства, предназначенные для одновременного подъема контактных проводов, должны устанавливаться на воздушных стрелках с пересечением как одиночных, так и двойных контактных проводов, которые примыкают к главным путям.

Анализ отказов и разрегулировок поддерживающих конструкций несущего и контактного провода показывает, что на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД» остаются участки, требующие применения современной интеллектуальной системы технического обслуживания [3]. Эта система должна прогнозировать остаточный жизненный цикл поддерживающих конструкций, оценивать необходимость продления срока жизненного цикла, содержать критерии принятия управляющих решений.

Экономическое обоснование решения о продлении назначенного срока службы поддерживающих конструкций несущего троса и контактного провода строится на сравнении экономического эффекта двух вариантов: с продлением срока службы объекта и без продления (объект своевременно выведен из эксплуатации). Выбор осуществляется в пользу решения, при реализации которого ожидаются наименьшие денежные затраты.

При рассмотрении вопроса о продлении срока службы объекта важно учитывать следующие составляющие стоимости его жизненного цикла:

затраты на оценку фактического состояния (оценка износа контактного провода, целостности несущего троса, коррозионного состояния опоры контактной сети, угла ее наклона и др.);

затраты на документальное оформление продления срока службы (заполнение паспорта опоры контактной сети, ведомости штрафных баллов вагон-лаборатории и др.);

дополнительную стоимость текущего содержания участка контактной сети (по сравнению с плановыми затратами на текущее содержание);

дополнительную стоимость плановых ремонтов устройств контактной сети (по сравнению с плановыми затратами).

Объекты контактной сети, по которым принимаются решения о продлении назначенного срока службы, представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, срок службы медных проводов, согласно ПУТЭКС, составляет 50 лет [5], но в действительности из-за большой интенсивности движения поездов он сокращается до 15–20 лет. Следовательно, необходимо повышать надежность проводов контактной подвески, что требует дополнительных затрат.

При расчете показателей эксплуатационной надежности устройств контактной сети перегона (станции) необходимо

определять допустимую, проектную и фактическую интенсивность отказов объекта.

Специалисты, ответственные за техническое обслуживание устройств контактной сети, по итогам работы за год, а в дальнейшем ежемесячно должны вносить значения фактических отказов на конкретных участках. По результатам заполнения таблиц и выполнения расчетов на основе сравнения допустимой, проектной и фактической интенсивности отказов объектов контактной сети принимается решение о реконструкции участка либо его капитальном ремонте.

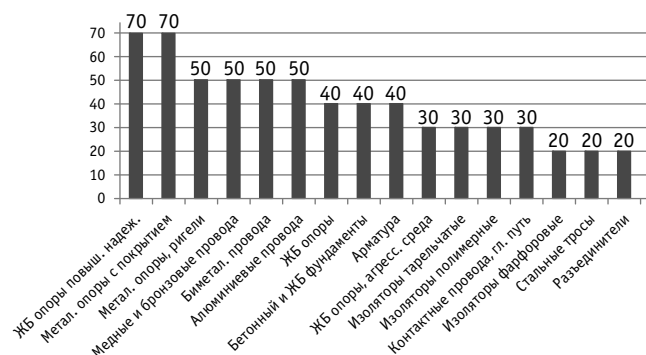


Рис. 2. Сроки службы устройств контактной сети, лет

В зависимости от сравнения значений допустимой, проектной и фактической интенсивности отказов возможны 6 сценариев, которые подробно проанализированы в [6, 7].

Рассмотрим предлагаемую методику расчета для оценки надежности участка контактной сети.

Количество эталонных анкерных участков для перегона $N_i^{\text{эКСпер}}$ и для станции $N_i^{\text{эКСстанц}}$ вычислим следующим образом:

$$N_i^{\text{эКСпер}} = \frac{L_i^{\text{КС}} \cdot k_i^{\text{К}}}{L_{\text{пер}}^{\text{КС}}}; \quad (1)$$

$$N_i^{\text{эКСстанц}} = \frac{L_i^{\text{КС}} \cdot k_i^{\text{К}}}{L_{\text{станц}}^{\text{КС}}},$$

где $L_i^{\text{КС}}$ — протяженность контактной сети, м;

$L_{\text{пер}}^{\text{КС}}$ — протяженность среднего перегонного анкерного участка, м;

$L_{\text{станц}}^{\text{КС}}$ — протяженность среднего станционного анкерного участка, м;

$k_i^{\text{К}}$ — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности элемента.

Для определения интенсивности отказов выполним расчет:

$$N_i^{\text{эКСпер}} = \frac{36000 \cdot 2,5}{1600} = 56,25 \text{ м перегонных анкерных участков};$$

$$N_i^{\text{эКСстанц}} = \frac{3000 \cdot 2,5}{1200} = 6,25 \text{ м станционных анкерных участков},$$

где 36000 — длина контактной сети, выполненной по проекту КС-120 для постоянного тока, м;

3000 — длина контактной сети, выполненной по проектам для скоростей движения 120 км/ч для постоянного тока, м;

2,5 — переводной коэффициент;

1600 — длина среднего перегонного анкерного участка, м;

1200 — длина среднего станционного анкерного участка, м.

Показатели надежности для участков контактной сети необходимо рассчитывать следующим образом [8, 9].

Интенсивность отказов $\lambda_i^{\text{эКС}}$, млн т брутто⁻¹, вычислим по формуле

$$\lambda_i^{\text{эКС}}(x) = \frac{\sum_{i=1}^k r_i^{\text{эКС}}}{\sum_{i=1}^n (N_i^{\text{эКС}}(T) \cdot \Delta T_i)}, \quad (2)$$

где $r_i^{\text{эКС}}$ — количество отказавших объектов контактной сети на дистанции электроснабжения за интервал наблюдения (год).

Запрашиваемый пропущенный тоннаж по выделенному перегону, т брутто:

$$\sum_{i=1}^n (N_i^{\text{эКС}}(T) \cdot \Delta T). \quad (3)$$

Среднюю наработку на отказ эталонных анкерных участков $\overline{T_{Oi}^{\text{эКС}}}$, млн т брутто, вычислим по формуле

$$\overline{T_{Oi}^{\text{эКС}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i^{\text{эКС}}(T) \cdot \Delta T_i)}{\sum_{i=1}^k r_i^{\text{эКС}}}. \quad (4)$$

Определим коэффициент готовности.

Пусть за период наблюдения зафиксирован 1 отказ контактного провода, общая длина повреждения 0,5 км. Продолжительность работы за период наблюдения, мин:

$$t_{\text{НАБЛ}} = 365 \cdot 24 \cdot 60 = 525600.$$

Норма трудозатрат на восстановление 1 км контактного провода составляет 49,2 чел.-ч.

Продолжительность простоя за период наблюдения t_O :

$$t_O = 49,2 \cdot 0,5 = 24,6 \text{ чел.-ч} = 1476 \text{ чел.-мин.}$$

Продолжительность работы за период наблюдения t_P вычислим по формуле, мин [10]:

$$t_P = t_{\text{НАБЛ}} - t_O, \quad (5)$$

$$t_P = 525600 - 1476 = 521124.$$

Коэффициент неготовности объекта контактной сети $K_{\text{НГ}}^{\text{эКС}}$ рассчитаем следующим образом:

$$t_{\text{эКС}}^O = 1476 \cdot 2,5 = 3690 \text{ чел.-мин};$$

$$t_{\text{эКС}}^P = 521124 \cdot 2,5 = 1302810 \text{ чел.-мин};$$

$$K_{\text{НГ}}^{\text{эКС}} = \frac{t_{\text{эКС}}^O}{t_{\text{эКС}}^P + t_{\text{эКС}}^O}, \quad (6)$$

$$K_{\text{НГ}}^{\text{эКС}} = \frac{3690}{1302810 + 3690} = 2,8 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент готовности объекта контактной сети $K_{\text{Г}}^{\text{эКС}}$ вычислим так:

$$K_{\text{Г}}^{\text{эКС}} = 1 - K_{\text{НГ}}^{\text{эКС}},$$

$$K_{\text{Г}}^{\text{эКС}} = 1 - 0,0028 = 0,997.$$

После этого можно перейти к оценке допустимой и фактической интенсивности отказов устройств контактной сети на рассматриваемых участках. В данном случае, сравнив результаты расчета с вариантами сценариев, выбирают один, по которому принимают управляющие решения. Обоснование планируемых мероприятий по техническому обслуживанию поддерживающих устройств несущего и контактного провода предлагаем вести с применением методов анализа риска, таких как анализ дерева событий, анализ дерева неисправностей и причинно-следственный анализ.

Литература

1. Окунев А. В. Разработка комплексного подхода к диагностике опор контактной сети на этапе эксплуатации : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2020. 266 с.
2. Ковалев А. А., Окунев А. В. Оценка состояния опор контактной сети на протяжении жизненного цикла // Инновационный транспорт. 2015. № 3 (17). С. 23–29. ISSN 2311–164X.

References

1. Okunev A. V. Development of complex approach to diagnostics of catenary poles on operation stage [Razrabotka kompleksnogo podkhoda k diagnostike opor kontaktnoy seti na etape ekspluatatsii] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2020. 266 p.
2. Kovalev A. A., Okunev A. V. Assessment of serviceability of catenary supports throughout the life cycle [Otsenka sostoyaniya opor kontaktnoy seti na protyazhenii zhiznennogo tsikla] // Innotrans. 2015. No. 3 (17). Pp. 23–29. ISSN 2311–164X.

3. Микава А. В. Обеспечение требуемых статических параметров скоростных и высокоскоростных контактных подвесок на этапах жизненного цикла : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2017. 156 с.
4. Смердин А. Н., Томилов В. В., Павлов В. М. Совершенствование методики определения нагрузочных показателей токоприемников магистрального электроподвижного состава // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 99–110. ISSN 2220–4245.
5. Ковалев А. А., Галкин А. Г. Теория и методы расчета стоимостных показателей системы токосъема на протяжении жизненного цикла : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. 115 с.
6. Ковалев А. А. Оценка сроков и стоимости жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта России // Транспортное дело России. 2014. № 2. С. 126–128. ISSN 2072–8689.
7. Окунев А. В., Ковалев А. А., Галкин А. Г. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 82–90. ISSN 2220–4245.
8. Ковалев А. А., Микава А. В. Определение максимальной продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815–9400.
9. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема // Транспорт Урала. 2012. № 3 (34). С. 85–89. ISSN 1815–9400.
10. Ковалев А. А., Иванищев А. Ю. Методика определения геометрических параметров консолей // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 73–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-73-76. ISSN 1815–9400.
3. Mikava A. V. Providing the required static parameters of high-speed overhead catenaries at life cycle stages [Obespechenie trebuyemykh staticheskikh parametrov skorostnykh i vysokoskorostnykh kontaktnykh podvesok na etapakh zhiznennogo tsikla] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2017. 156 p.
4. Smerdin A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement methods of checking of electrical duty indicators of rolling stocks pantographs [Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya nagruzochnykh pokazateley tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 4 (40). Pp. 99–110. ISSN 2220–4245.
5. Kovalev A. A., Galkin A. G. Theory and methods of calculating current collection system costs throughout life-cycle [Teoriya i metody rascheta stoimostnykh pokazateley sistemy tokos'ema na protyazhenii zhiznennogo tsikla] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2015. 115 p.
6. Kovalev A. A. Assessment of period and cost of life cycle of railway transport objects in Russia [Otsenka srokov i stoimosti zhiznennogo tsikla ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta Rossii] // Transport business of Russia. 2014. No. 2. Pp. 126–128. ISSN 2072–8689.
7. Okunev A. V., Kovalev A. A., Galkin A. G. Determination of the limit states of the support of a contact network on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capability [Opredelenie predel'nykh sostoyaniy opor kontaktnoy seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushhey sposobnosti] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 2 (38). Pp. 82–90. ISSN 2220–4245.
8. Kovalev A. A., Mikava A. V. Determination of maximum life cycle of catenary cantilevers [Opredelenie maksimal'noy prodolzhitel'nosti zhiznennogo tsikla konsoley kontaktnoy seti] // Transport of the Urals. 2019. No. 4 (63). Pp. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815–9400.
9. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system [Primenenie kontrakta zhiznennogo tsikla dlya infrastrukturnogo kompleksa sistemy tokos'ema] // Transport of the Urals. 2012. No. 3 (34). Pp. 85–90. ISSN 1815–9400.
10. Kovalev A. A., Ivanishhev A. Yu. Method of determining the cantilever geometric parameters [Metodika opredeleniya geometricheskikh parametrov konsoley] // Transport of the Urals. 2018. No. 2 (57). Pp. 73–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-73-76. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,55 авторских листа

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</p> <p>КПП: 667001001 ИНН: 6670317893</p> <p>ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192</p> <p>в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</p> <p>БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795</p> <p>Код бюджетной классификации (КБК): _____</p> <p>Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</p> <p>Платательщик: _____</p> <p>Адрес платателя: _____</p> <p>ИНН платателя: _____ № л/сч. платателя: _____</p> <p>Сумма: _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2020 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</p> <p>КПП: 667001001 ИНН: 6670317893</p> <p>ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192</p> <p>в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</p> <p>БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795</p> <p>Код бюджетной классификации (КБК): _____</p> <p>Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</p> <p>Платательщик: _____</p> <p>Адрес платателя: _____</p> <p>ИНН платателя: _____ № л/сч. платателя: _____</p> <p>Сумма: _____ руб. ____ коп.</p> <p>Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2020 г.</p>

Подписка на 2020 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество
комплектов:

на 2020 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2020 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (65), 2020 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Илья Ефимович Рабинович

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.06.2020 Выход в свет 12.08.2020

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Цена 330 руб.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета
в типографии ООО «Универсальная Типография «Альфа Принт».

620049, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пер. Автоматики, д. 2ж.

Тел. 8-800-300-16-00. Сайт: www.alfaprint.ru

Заказ № 12107

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2020

