

ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УРАЛ

**ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ КОМФОРТА ПассаЖИРОВ
В ПОЕЗДАХ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ НАКЛОНОМ КУЗОВА
В КРИВЫХ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**О СОБЛЮДЕНИИ ПРИНЦИПА ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
В НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ
ПО ОЦЕНКЕ РИСКОВ ДЛЯ ОАО «РЖД»**



**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ДВУХСИСТЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭВ120
ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОЛИГОНЕ КУЗБАСС — ЦЕНТР**

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
СИСТЕМЫ ВПУСКА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ЗА СЧЕТ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ КАНАЛОВ**



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
6. Валерий Доманский, д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

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 Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
14. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
15. 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
6. Valeriy Domansky, DSc, professor of National technical University "Kharkiv politechnical institute", Kharkiv, Ukraine

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, Ekaterinburg
13. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
14. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
15. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

- Д. Я. Антипин, П. В. Ваулин, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков.
Исследование уровня комфорта пассажиров в поездах с принудительным наклоном кузова в кривых методами математического моделирования 3
- О. И. Вережкина.
О соблюдении принципа единства измерений в нормативной документации по оценке рисков для ОАО «РЖД» 9

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

- Д. В. Ефанов, Д. В. Седых, М. А. Гордон.
Особенности автоматизации проектирования аппаратных средств для непрерывного мониторинга аналоговых сигналов в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики 14
- В. В. Ляной, Р. В. Гнилько.
Разработка упрощенной математической модели взаимодействия индуктивного датчика колеса с железнодорожным колесом 24
- А. М. Костроминов, Ал-р А. Костроминов, О. Н. Тюляндин.
Влияние дисперсий компонентов на электромагнитную совместимость устройств 29
- Ю. В. Могильников, К. В. Гундырев, Р. З. Галинуров.
Системы управления движением поездов в контексте высокоскоростного сообщения 35

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

- В. Ю. Пермикин, Э. В. Васильев, А. В. Малахов, А. Ю. Ландышев, В. А. Кукушкин.
Исследование тяговых возможностей двухсистемного электровоза 2ЭВ120 для эксплуатации на полигоне Кузбасс — Центр 41

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

- И. А. Тараторкин, В. Б. Держанский, А. И. Тараторкин, А. А. Волков.
Повышение скоростных качеств гусеничных машин, оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами 49
- С. В. Елисеев, А. И. Орленко, А. В. Елисеев.
Структурные образования в механических колебательных системах: диады, их свойства, возможности изменения динамических состояний 56
- Н. И. Григорьев, Н. С. Кочев, Л. В. Плотников.
Улучшение экономических и экологических характеристик дизельного двигателя за счет применения цикла Миллера 64

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Г. Л. Аккерман, О. О. Тимошенко.
Определение предвыбросного состояния пути по результатам промеров вагонов-путеизмерителей 68

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

- А. В. Владыкин, Н. О. Фролов.
Оптимизация тягового привода как способ снижения капитальных вложений и эксплуатационных расходов 72

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес.
Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности 75

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

- Л. В. Плотников, А. М. Неволин, М. О. Мисник.
Газодинамическое совершенствование системы впуска автомобильного двигателя за счет поперечного профилирования каналов 82

АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ

- Т. С. Тарасовский.
Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 87

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

- D. Ya. Antipin, P. V. Vaulin, V. F. Lapshin, A. S. Mitrakov.
The research of passenger comfort level in trains with forced body tilt in curves by mathematical modeling methods 3
- O. I. Verezhkina.
On the observance of the principle of the uniformity of measurements in the regulatory documentation on risk assessment for JSC Russian Railways 9

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

- D. V. Efanov, D. V. Sedykh, M. A. Gordon.
Features of design automation of hardware for analog signals health monitoring in railway signaling devices 14
- V. V. Lyanoy, R. V. Gnitsko.
Development of a simplified mathematical model for the interaction of the inductive wheel sensor with a railway wheel 24
- A. M. Kostrominov, Al-r A. Kostrominov, O. N. Tyulyandin.
Effect of component dispersions on the electromagnetic compatibility of devices 29
- Yu. V. Mogilnikov, K. V. Gundyrev, R. Z. Galinurov.
Control systems of trains traffic in the context of high-speed means of communication 35

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

- V. Yu. Permikin, E. V. Vasilyev, A. V. Malakhov, A. Yu. Landyshev, V. A. Kukushkin.
The research of traction capabilities of a two-system electric locomotive 2EV120 for operation at the Kuzbass-Center testing polygon 41

TRANSPORT MACHINERY

- I. A. Taratorkin, V. B. Derzhanskiy, A. I. Taratorkin, A. A. Volkov.
Increasing the degree of realization of the potential of high-speed properties of tracked vehicles with discrete properties by turning the control system 49
- S. V. Eliseev, A. I. Orlenko, A. V. Eliseev.
Dyad as the system-forming basis of dynamic properties of vibrating structures 56
- N. I. Grigoryev, N. S. Kochev, L. V. Plotnikov.
Improving the economic and environmental characteristics of diesel engine by application of Miller's cycle 64

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

- G. L. Akkerman, O. O. Timoshenko.
Determination of the pre-emission state of the track based on the results of measurements of the wagon-tracker 68

ELECTRIC TRACTION

- A. V. Vladikin, N. O. Frolov.
Optimizing the traction drive as a way to reduce capital investment and operating costs 72

ELECTRIC SUPPLY

- V. T. Cheremisin, V. L. Nezevak, V. V. Erbes.
Evaluating of voltage regulation on the side of high voltage of traction substation in aspect energy efficiency 75

MOTOR TRANSPORT

- L. V. Plotnikov, A. M. Nevolin, M. O. Misnik.
Modernization of the intake pipe configuration of the 21/21 diesel on the basis of numerical modeling 82

RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

- T. S. Tarasovskiy.
Thyristor-reactor voltage regulation device under load of RPN converter transformer TRSZP-12500/10 ZhU1 87

УДК 629.423.2

Дмитрий Яковлевич Антипин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,

Петр Васильевич Ваулин, начальник отдела расчетов ООО «Уральские локомотивы», Верхняя Пышма, Россия,

Василий Федорович Лапшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Артем Сергеевич Митраков, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ КОМФОРТА ПассаЖИРОВ В ПОЕЗДАХ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ НАКЛОНОМ КУЗОВА В КРИВЫХ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Dmitriy Yakovlevich Antipin, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Railway Rolling Stock Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Petr Vasilyevich Vaulin, Head of Settlement Department, LLC Ural Locomotives, Verkhnyaya Pyshma, Russia,

Vasily Fedorovich Lapshin, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Artem Sergeyevich Mitrov, postgraduate student, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

The research of passenger comfort level in trains with forced body tilt in curves by mathematical modeling methods

Аннотация

В статье рассмотрена возможность внедрения системы принудительного наклона кузова на базе электропоезда ЭС2Г. Для этого разработана и верифицирована компьютерная модель движения подвижного состава по реальным неровностям пути. Предложена методика оценки безопасности и комфорта пассажиров, основанная на использовании антропометрических манекенов. Изучено влияние работы системы принудительного наклона кузова на комфорт пассажиров. По результатам исследований сделаны выводы о возможности создания на базе ЭС2Г отечественного подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова.

Ключевые слова: подвижной состав, система принудительного наклона кузова, математическое моделирование, динамические характеристики, критерии комфорта, антропометрические манекены.

Summary

The article considers the possibility of introducing a forced tilt system based on the electric train ES2G. For this purpose, a computer model of the rolling stock movement is developed and verified according to the real unevenness of the track. A technique for assessing the safety and comfort of passengers based on the use of anthropometric mannequins is proposed. The influence of the forced tilt system on passenger comfort was studied. Based on the results of the research, conclusions were drawn about the possibility of creating on the basis of ES2G a domestic rolling stock equipped with a forced tilt body system.

Keywords: rolling stock, forced body tilt system, mathematical modeling, dynamic characteristics, comfort criteria, anthropometric mannequins.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-3-8

С развитием в России городских агломераций наблюдается тенденция увеличения «маятниковой миграции» населения. Например, ежегодно в пригородном направлении перевозится более 927 млн пассажиров [1], однако на фоне роста пассажиропотока востребованность железнодорожного транспорта остается невысокой. Это объясняется длительным временем нахождения пассажиров в пути и невысоким уровнем комфорта, что в первую очередь связано с необходимостью снижения скорости движения подвижного состава при прохождении криволинейных участков пути. Анализ мирового опыта организации современного пассажирского движения на существующих линиях [2] показал, что эффективным решением, увеличивающим среднюю маршрутную скорость, является использование подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова (СПНК).

На отечественных железных дорогах в настоящее время успешно эксплуатируются два типа подвижного состава, оборудованного подобными системами:

на маршруте Санкт-Петербург — Хельсинки — поезда Pendolino Sm6 производства французского концерна Alstom; на маршрутах Москва — Нижний Новгород и Москва — Берлин — поезда Talgo 250 производства испанской компании Talgo.

Использование этих поездов позволило увеличить максимальную скорость прохождения кривых участков пути более

чем на 20 % при одновременном обеспечении высоких показателей комфорта. Данный эффект достигается за счет компенсации центробежных сил, действующих на подвижной состав и пассажиров, принудительным наклоном кузова внутрь кривой. Успешный опыт эксплуатации пассажирских поездов, оборудованных СПНК, подтверждает актуальность создания аналогичных отечественных пассажирских систем.

При разработке подвижного состава с СПНК следует учитывать дополнительные факторы, влияющие на комфорт пассажиров и безопасность движения. В связи с этим возникает необходимость создания методик, позволяющих на стадии проектирования оценивать влияние работы СПНК (с учетом возможности изменения ее параметров) на динамические характеристики подвижного состава, параметры взаимодействия с путевой инфраструктурой и на комфорт пассажиров. В соответствии с условиями эксплуатации должны рассматриваться такие параметры, как скорость движения, радиусы кривых, жесткость пути в зависимости от времени года, количество пассажиров, их расположение в вагоне, настройки системы наклона и т.д.

При проектировании отечественных поездов, оборудованных СПНК, наряду с традиционными критериями оценки безопасности и комфорта пассажиров, регламентируемыми требованиями Таможенного союза [3], учитываются дополнительные критерии, связанные с работой СПНК. Уровень комфорта пассажиров в поездах, оборудованных СПНК, целесообразно оценивать по следующим критериям [4]:

показателям плавности хода W_z , W_y в соответствии с ГОСТ 33796–2016 [5];

коэффициентам среднего комфорта N_{MV} по CEN 12299 [6];

индексу комфорта в кривых участках пути P_{CT} [6];

дозе укачивания $MSDV_z$ по ISO 2631–1.2 [7];

уровню недомогания $IR(t)$ [8];

«чистой» дозе укачивания NR [9].

В соответствии с CEN 12299 [6] уровень комфорта пассажиров в прямых участках пути определяется с помощью коэффициента среднего комфорта N_{MV} на основе ускорений по трем направлениям на уровне пола вагона:

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP}^{Wd})^2 + (a_{YP}^{Wd})^2 + (a_{ZP}^{Wd})^2},$$

где a_{XP}^{Wd} , a_{YP}^{Wd} и a_{ZP}^{Wd} — ускорения, действующие на пассажира в продольном, боковом и вертикальном направлении соответственно, м/с².

Для определения процента пассажиров, испытывающих дискомфорт в криволинейных участках пути, используется зависимость [6]

$$P_{CT} = 100 \cdot \left\{ \max \left[A \cdot |\ddot{y}_{ls}|_{\max} + B \cdot |\ddot{y}_{ls}|_{\max} \cdot C; 0 \right] + (D \cdot |\dot{\phi}_{ls}|_{\max})^E \right\},$$

где \ddot{y}_{ls} — боковое ускорение кузова, м/с²;

$\dot{\phi}_{ls}$ — изменение бокового ускорения кузова в течение 1 с, м/с³;

$\dot{\phi}_{ls}$ — угловая скорость кузова, рад/с;

A, B, C, D, E — постоянные, принимаемые по [6].

При прогнозировании укачивания пассажиров с учетом различных факторов, а также времени на развитие эффекта предлагается использовать «чистую» дозу укачивания NR [9], определяемую как

$$NR = \beta_0 + (\beta_1 \cdot a_{ywf} + \beta_2 \cdot a_{xwf}^2) \cdot \sqrt{t},$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ — константы, принимаемые в соответствии с моделью, описывающей движение;

a_{ywf}, a_{xwf} — среднеквадратичное частотно-взвешенное ускорение для горизонтального поперечного направления и вращения относительно продольной оси, м/с².

Однако следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 33796–2016 [5] уровень комфорта пассажиров основывается на данных об ускорениях, действующих на конструкциях кузова (обычно на полу пятничковой зоны и середины кузова), и определяется только интегрально — без учета особенностей воздействия на пассажиров при работе СПНК. С другой стороны, методики, ориентированные на оценку уровня комфорта пассажиров подвижного состава, оборудованного СПНК [6, 9, 10], как правило, используют либо статистические данные, полученные при опросе пассажиров, либо экспериментальные, полученные на специализированных стендах с участием фокус-групп. Эти подходы требуют значительных временных и материальных затрат и не позволяют на стадии проектирования с достаточной точностью прогнозировать значения критериев комфорта пассажиров. В то же время сегодня активно развиваются методы исследования динамических воздействий на человека-оператора или пассажиров различных видов транспорта при помощи антропометрических манекенов — как натуральных, так и цифровых [11, 12]. В связи с этим для оценки уровня комфорта пассажиров подвижного состава, оборудованного СПНК, нами предлагается методика, разработанная на основе использования совокупности традиционных подходов и математических моделей антропометрических манекенов. В методике в качестве исходных данных для расчета критериев комфорта пассажиров приняты динамические показатели, полученные не на конструкциях кузова, а на элементах математической модели антропометрических манекенов с учетом места расположения пассажира внутри подвижного состава. В качестве объекта для апробации методики предлагается использовать отечественный электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭС2Г «Ласточка» производства ООО «Уральские локомотивы».

В настоящее время наиболее широко применяются методы математического моделирования, основанные на высокопроизводительных алгоритмах решения систем дифференциальных уравнений и адаптированные для использования в компьютерных вычислительных комплексах с реализацией распределенных вычислений. Обзор современных прикладных программ показал, что в качестве инструмента для решения поставленных задач целесообразно использовать отечественный программный комплекс моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» [13].

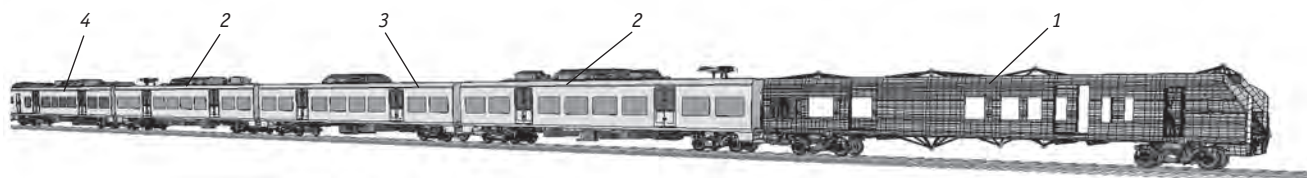


Рис. 1. Динамическая модель электропоезда ЭС2Г «Ласточка»:

1 — гибридная модель головного вагона; 2 — твердотельные модели прицепных вагонов;
3 — твердотельная модель моторного вагона; 4 — твердотельная модель головного вагона

Для исследования динамических характеристик рассматриваемого подвижного состава на первом этапе была разработана многоуровневая математическая модель движения электропоезда по реальным неровностям пути. Компьютерная модель сформирована на основе метода подсистем. Вагоны электропоезда: головной, прицепной, моторный — это подсистемы первого уровня, состоящие, в свою очередь, из подсистем второго уровня. Подсистема второго уровня «кузов вагона» — абсолютно твердое тело, имитирующее реальные инерциальные характеристики кузова. Расположение тяжеловесного внутреннего и навесного оборудования учитывалось путем добавления дополнительных тел. Ходовые части описывались подсистемами второго уровня «моторная тележка» и «немоторная тележка», сформированными абсолютно твердыми телами, соединенными шарнирами, контактными и специальными силовыми элементами, имитирующими нелинейные упруго-диссипативные свойства.

На втором этапе в соответствии с рекомендациями [14] учитывались упругие свойства несущей конструкции кузова. Для этого в среде модуля программного комплекса трехмерного проектирования Siemens NX Advanced Simulation были созданы трехмерные детализированные пластинчатые несущие модели кузовов каждого из вагонов. Инерционные характеристики оборудования моделировались путем добавления в центрах масс специальных узловых элементов, соединенных стержневыми элементами с местами крепления на кузове. КЭ-модели кузовов объединялись с твердотельными моделями ходовых частей, образуя гибридные подсистемы первого уровня. С целью снижения необходимой вычислительной мощности в динамической модели состава упругие свойства кузовов учитывались путем попеременной замены твердотельных подсистем исследуемых вагонов на гибридные (рис. 1).

Верификация разработанной компьютерной модели проводилась путем сопоставления таких динамических характеристик, полученных при натурных испытаниях и моделировании, как рамные силы, ускорения кузова на уровне пола в пятниковых зонах в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях, минимальные коэффициенты запаса устойчивости при движении вагона по прямолинейному участку пути, криволинейным участкам пути радиусами 350 и 625 м, стрелочному переводу типа Р65 с крестовиной 1/11. Сравнение полученных результатов показало их качественное и количественное совпадение с максимальным расхождением не более 18,6% [15].

Для апробации предложенной методики оценки комфорта пассажиров динамическая модель моторвагонного подвижного состава ЭС2Г была дополнена системой принудительного наклона кузова. В модели наклон кузова осуществлялся пу-

тем создания разницы давлений в пневморессорах вторичной ступени подвешивания. Для реализации СПНК из схемы была исключена система стабилизации, устанавливаемая на серийный электропоезд. Предложенный вариант позволил достигнуть угла наклона кузова относительно тележки вагона до 8° в криволинейных участках пути. Управление углом наклона кузова производилось в цифровом процессоре Matlab/Simulink на основе данных о скорости движения, кривизне кривой, координатах начала и конца криволинейных участков.

Для оценки динамических воздействий на пассажира в модель были включены элементы пассажирского салона (кресла, поручни), а также математические модели антропометрических манекенов. Модели манекенов представляли собой подсистемы, состоящие из абсолютно твердых тел, взаимодействующих между собой через шарниры, контактные и специальные биопольярные элементы. Параметры антропометрического манекена соответствовали физическому манекену типа Hybrid III 50th Male Dummy, применяемому для проведения краш-тестов [4]. Взаимодействие частей твердых тел манекена с элементами пассажирского салона осуществлялось с использованием системы контактных элементов.

В исследовании рассматривалось динамическое воздействие на пассажиров, сидящих в креслах в концевых и средней частях вагона на местах у окна и прохода, а также стоящих в проходе между сиденьями в пятниковых зонах (рис. 2).

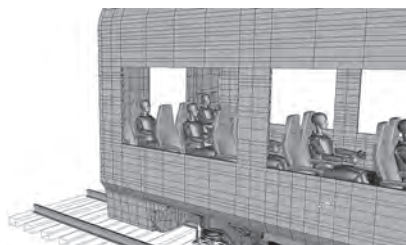


Рис. 2. Пример размещения манекенов в салоне кузова гибридного вагона

В качестве измерительных участков для моделирования движения выбраны прямые, кривые с радиусом 300, 500, 700 и 1200 м, стрелочный перевод марки Р65 с крестовиной 1/11. Во время исследования проводилось поэтапное повышение скоростей от 20 до 160 км/ч с шагом в 20 км/ч, при движении на боковое направление стрелочного перевода — от 15 до 50 км/ч. При моделировании рассматривалось движение состава в кривых с минимально допустимыми для соответствующей скорости радиусами.

При исследовании динамических характеристик рассматривались два варианта состава электропоезда: оборудованного и не оборудованного СПНК. В результате моделирования для каждого из вагонов подвижного состава получены следующие динамические характеристики:

ускорения в вертикальной и горизонтальной плоскости в среднем сечении кузова и пятниковой зоне;

рамные силы;

динамические вертикальные прогибы буксовой ступени подвешивания;

коэффициенты динамических надбавок по вертикальным колебаниям подрессоренных масс;

коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса;

максимальные величины горизонтальных нагрузок, передаваемых от колес вагонов на головку рельса (боковые силы).

В качестве примера на рис. 3 приведены графики зависимости вертикальных и горизонтальных ускорений в пятниковых зонах и рамных сил от скорости движения подвижного состава в криволинейных участках пути и стрелочных переводах.

Анализ полученных результатов показал, что для рассматриваемого железнодорожного состава применение СПНК в кривых участках пути позволило добиться снижения:

рамных сил — на 18 %;

горизонтальных поперечных ускорений кузова — на 21 %;

вертикальных ускорений кузова — на 15 %.

При движении на боковое направление стрелочного перевода для состава с работающей СПНК снижение динамических показателей составило:

для рамных сил — 14 %;

горизонтальных поперечных ускорений кузова — 20 %;

вертикальных ускорений кузова — 11 %.

Оценка уровня комфорта пассажиров производилась по приведенным выше критериям. Коэффициенты плавности хода в соответствии с [5] определялись на уровне пола каждого из вагонов для середины кузова и в пятниковых зонах над каждой из тележек, для головных вагонов — дополнительно на полу в кабине машиниста. Индексы комфорта рассчитывались на основе измерений уровня динамических показателей манекенов в соответствии с [6] для стоящих и сидящих пассажиров. Расчет показателей укачивания производился только для сидящих пассажиров. Места расположения манекенов, для которых определялись значения критериев, показаны на рис. 4.

Результаты расчета указанных критериев для пассажиров, находящихся в различных положениях, приведены в табл. 1.

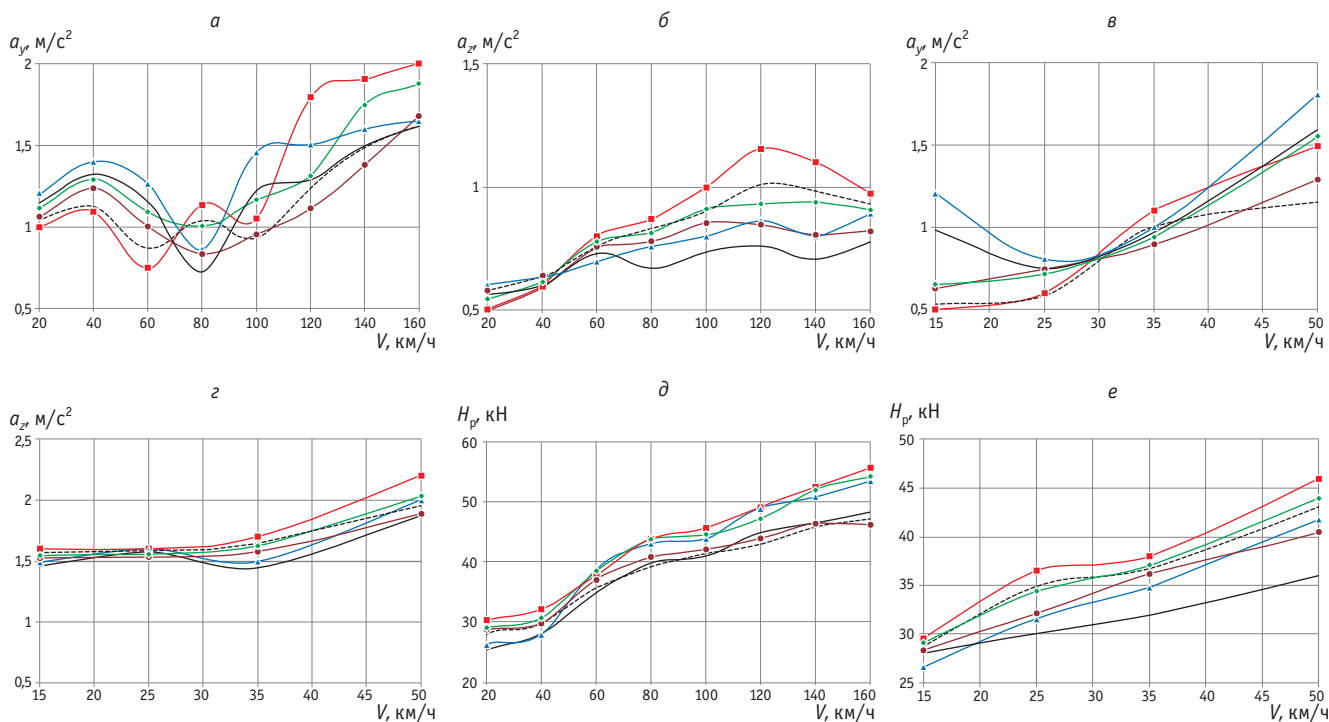


Рис. 3. Графики зависимости динамических характеристик вагонов от скорости движения:

а — горизонтальное поперечное ускорение в кривых участках пути; *б* — вертикальное ускорение в кривых участках пути;

в — горизонтальное поперечное ускорение при движении на боковое направление стрелочного перевода;

г — вертикальное ускорение при движении на боковое направление стрелочного перевода; *д* — рамные силы в кривых участках пути;

е — рамные силы при движении на боковое направление стрелочного перевода;

—■— головной вагон; —▲— прицепной; —◆— моторный;

----- головной с СПНК; ——— прицепной с СПНК; —●— моторный с СПНК

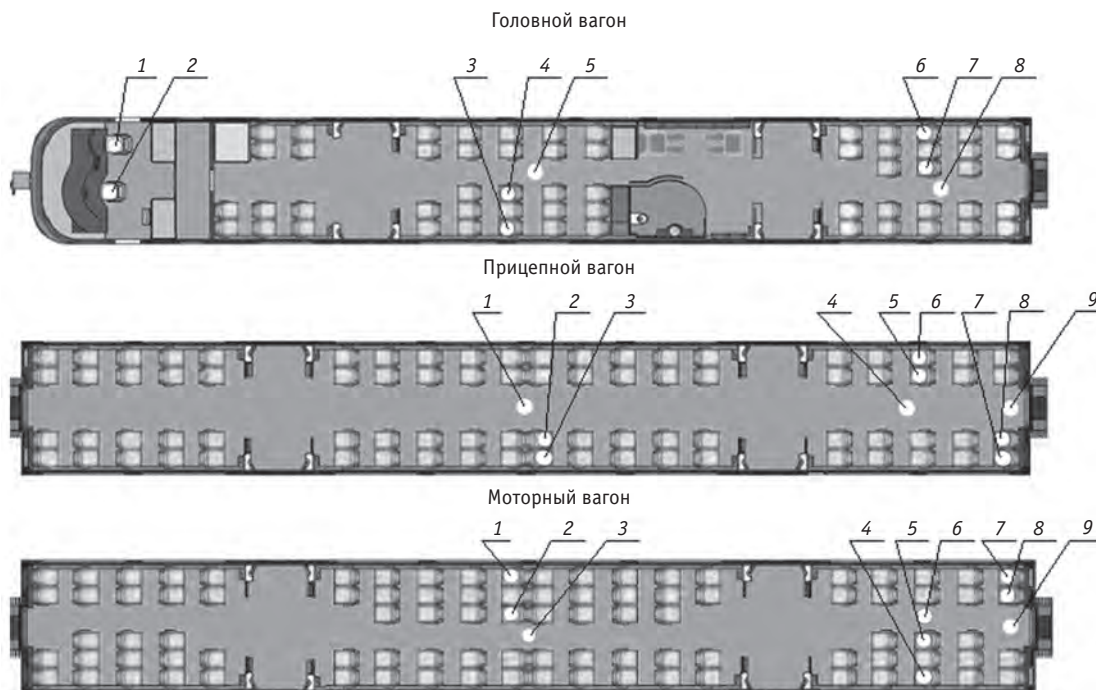


Рис. 4. Расположение манекенов, для которых определялись индексы комфорта

Таблица 1

Результаты расчета критериев комфорта для пассажиров

| Позиция в салоне вагона | Критерии оценки комфорта | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-------|----------|----------|-------|---------|
| | W_z | W_y | N_{MV} | P_{CT} | NR | $IR(t)$ |
| Головной вагон | | | | | | |
| 1 | 2,1 | 2,46 | 2,93 | 18,72 | 1,839 | 0,671 |
| 2 | | | | 18,83 | 1,843 | 0,680 |
| 3 | 2,18 | 2,2 | 2,38 | 15,72 | 1,605 | 0,760 |
| 4 | | | | 15,63 | 1,598 | 0,756 |
| 5 | | | | 22,86 | — | |
| 6 | 2,07 | 2,48 | 2,9 | 19,07 | 1,862 | 0,634 |
| 7 | | | | 18,94 | 1,853 | 0,628 |
| 8 | | | | 27,11 | — | |
| Прицепной вагон | | | | | | |
| 1 | 2,15 | 2,05 | 1,82 | 19,96 | — | |
| 2 | | | | 13,98 | 1,532 | 0,726 |
| 3 | | | | 14,12 | 1,549 | 0,731 |
| 4 | 1,98 | 2,5 | 2,74 | 26,93 | — | |
| 5 | | | | 19,03 | 1,869 | 0,532 |
| 6 | | | | 18,96 | 1,860 | 0,529 |
| 7 | 2 | 2,47 | 2,78 | 18,68 | 1,847 | 0,554 |
| 8 | | | | 18,76 | 1,853 | 0,566 |
| 9 | | | | 26,52 | — | |
| Моторный вагон | | | | | | |
| 1 | 2,25 | 2,13 | 2,39 | 14,81 | 1,612 | 0,84 |
| 2 | | | | 14,73 | 1,603 | 0,834 |
| 3 | | | | 21,17 | — | |
| 4 | 2,03 | 2,43 | 2,69 | 18,06 | 1,815 | 0,589 |
| 5 | | | | 18,13 | 1,827 | 0,597 |
| 6 | | | | 25,13 | — | |
| 7 | 2,1 | 2,40 | 2,78 | 17,73 | 1,796 | 0,669 |
| 8 | | | | 17,59 | 1,781 | 0,658 |
| 9 | | | | 24,36 | — | |

Анализ данных табл. 1 показал соответствие полученных результатов допускаемым значениям уровня комфорта пассажиров. Для рассматриваемого в работе пассажирского состава, оборудованного СПНК, величины критериев не достигают уровня, указывающего на возможность дискомфорта у пассажиров, связанного с работой СПНК. В частности, для показателя плавности хода величины не превышают максимально допустимых в соответствии с [5]. Наибольшие значения в вертикальном направлении W_z зафиксированы в середине моторного вагона (2,25), в горизонтальном поперечном направлении W_y — в пятниковых зонах прицепных вагонов (2,5). Для величин среднего комфорта N_M , наилучшие показатели достигаются в середине прицепного вагона, наихудшие — в кабине машиниста головного вагона.

На основе анализа процента пассажиров, испытывающих дискомфорт (P_{CT}), сделан вывод, что среди стоящих пассажиров худшим местом является проход между сиденьями у межаванного перехода, наиболее комфортным — середина прицепного вагона. Для сидящих пассажиров — соответственно в концевых частях вагона у окна и в центре вагона у прохода. По результатам прогнозирования уровня недопомогания $IR(t)$

наименее подвержены появлению и развитию укачивания пассажиры, сидящие на местах в пятниковых зонах у прохода, наиболее подвержены — сидящие у окна. Для «чистой» дозы укачивания NR наблюдается обратная картина развития заболевания у пассажиров. Это объясняется тем, что в качестве исходных данных для прогнозирования используются частотно-взвешенные ускорения, действующие в разных направлениях.

Выводы

1. Разработанная методика исследования уровня комфорта пассажиров в поездах с принудительным наклоном кузова в кривых методами математического моделирования может быть использована на стадии проектирования для оценки влияния работы СПНК на динамические характеристики подвижного состава, параметры взаимодействия с путевой инфраструктурой и комфорта пассажиров.

2. Результаты математического моделирования подтверждают целесообразность использования СПНК на электропоездах ЭС2Г для обеспечения удовлетворительных показателей комфорта при прохождении кривых участков пути с повышенными скоростями.

Литература

1. Транспорт и связь в России 2016 : стат. сб. / Росстат. М., 2016. 112 с.
2. Persson R. Tilting trains, a description and analysis of the present situation. Report. ISBN 978-91-7178-608-1. KTH Railway Vehicles. Stockholm, 2007.
3. О безопасности железнодорожного подвижного состава : технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 001/2011) [Электронный ресурс]. URL: http://www.tsouz.ru/KTS/KTS29/Documents/P_710_9.pdf (дата обращения: 08.08.2017).
4. Исследование динамических характеристик отечественного пассажирского подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова в кривых / Д. Я. Антипин, В. В. Кобищанов, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 54–59. ISSN 1815-9400.
5. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. М. : Стандартинформ, 2016. 36 с.
6. CEN. Railway applications — Ride comfort for passengers — Measurement and evaluation. EN 12299:2009. European Committee for Standardization. Brussels, 2009.
7. ISO 2631–1.2:1997. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibrations. Part 1: General requirements. Geneva, 1997.
8. CEN: (2007). Railway applications — Ride comfort for passengers — Measurements and evaluation. Enquiry version prEN 12299. CEN. Brussels, 2007.
9. Forsberg J. Ride comfort and motion sickness in tilting trains. Stockholm, 2000. 234 p.
10. Persson R. Tilting trains — technology, benefits and motion sickness. Licentiate thesis. ISBN 978-91-7178-972-3. KTH Rail Vehicles. Stockholm, 2008.
11. Kan C.-D., Marzougui D., Bedewi N. E. Development of a 50th Percentile Hybrid III Dummy Model. 4th European LS-DYNA Users Conference, 22–23 May 2003, Ulm, Germany.
12. Антипин Д. Я., Кобищанов В. В., Шорохов С. Г. Оценка безопасности локомотивной бригады электропоезда при продольном аварийном соударении с препятствием // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 47–49. ISSN 1994-831X.
13. Универсальный механизм : рук. пользователя. Брянск, 2006.
14. Михеев Г. В. Компьютерное моделирование динамики систем абсолютно твердых и упругих тел, подверженных малым деформациям : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2004. 153 с.
15. Протокол по результатам приемочных динамико-прочностных испытаний электропоезда с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ, серийное обозначение ЭС2Г. М. : ВНИИЖТ, 2014.

References

1. Transport i svyaz' v Rossii 2016 [Transport and communications in Russia 2016] : stat. sb. / Rosstat. M., 2016. 112 s.
2. Persson R. Tilting trains, a description and analysis of the present situation. Report. ISBN 978-91-7178-608-1. KTH Railway Vehicles. Stockholm, 2007.
3. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [On the safety of railway rolling stock] : tekhnicheskiiy reglament Tamozhennogo soyuza (TR TS 001/2011) [Electronic resource]. URL: http://www.tsouz.ru/KTS/KTS29/Documents/P_710_9.pdf (access date: 08.08.2017).
4. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik otechestvennogo passazhirskogo podvizhnogo sostava, oborudovannogo sistemoy prinuditel'nogo naklona kuzova v krivykh [Study of dynamic performance of a Russian passenger rolling stock, equipped with powered banking system] / D. Ya. Antipin, V. V. Kobishchanov, V. F. Lapshin, A. S. Mitrovskiy // Transport Urala. 2015. № 3 (46). S. 54–59. ISSN 1815-9400.
5. GOST 33796–2016. Motorvagonnyy podvizhnyy sostav. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Motor-car rolling stock. Requirements for strength and dynamic qualities]. M. : Standartinform, 2016. 36 s.
6. CEN. Railway applications — Ride comfort for passengers — Measurement and evaluation. EN 12299:2009. European Committee for Standardization. Brussels, 2009.
7. ISO 2631-1.2:1997. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibrations. Part 1: General requirements. Geneva, 1997.
8. CEN: (2007). Railway applications — Ride comfort for passengers — Measurements and evaluation. Enquiry version prEN 12299. CEN. Brussels, 2007.
9. Forsberg J. Ride comfort and motion sickness in tilting trains. Stockholm, 2000. 234 p.
10. Persson R. Tilting trains — technology, benefits and motion sickness. Licentiate thesis. ISBN 978-91-7178-972-3. KTH Rail Vehicles. Stockholm, 2008.
11. Kan C.-D., Marzougui D., Bedewi N. E. Development of a 50th Percentile Hybrid III Dummy Model. 4th European LS-DYNA Users Conference, 22–23 May 2003, Ulm, Germany.
12. Antipin D. Ya., Kobishchanov V. V., Shorokhov S. G. Otsenka bezopasnosti lokomotivnoy brigady elektropoezda pri prodol'nom avariynom soudarenii s prepyatstviem [Evaluation of an electrical train's locomotive crew safety in case of emergency axial collision against a barrier] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2015. № 3 (58). S. 47–49. ISSN 1994-831X.
13. Universalnyy mekhanizm : ruk. pol'zovatelya [Universal mechanism : user's guide]. Bryansk, 2006.
14. Mikheev G. V. Komp'yuternoye modelirovaniye dinamiki sistem absol'yutno tverdykh i uprugikh tel, podverzhennykh malym deformatsiyam : dis. ... kand. tekhn. nauk [Computer modeling of the dynamics of systems of absolutely rigid and elastic bodies subject to small deformations : PhD in Engineering Thesis]. Bryansk, 2004. 153 s.
15. Protokol po rezultatam priemochnykh dinamiko-prochnostnykh ispytaniy elektropoezda s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE, seriynoye oboznachenie ES2G [Protocol on the results of acceptance dynamic-strength tests of an electric train with an asynchronous traction drive type EGE, serial designation ES2G]. M. : VNIIZhT, 2014.

УДК 656.25 (2Р37) + 06

Ольга Ивановна Веревкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия

О СОБЛЮДЕНИИ ПРИНЦИПА ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ РИСКОВ ДЛЯ ОАО «РЖД»

Olga Ivanovna Verevkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia

On the observance of the principle of the uniformity of measurements in the regulatory documentation on risk assessment for JSC Russian Railways

Аннотация

В статье анализируются подходы к методу расчета рисков на диспетчерских участках. Установлено несоответствие некоторых положений «Методики нормирования риска безопасности движения в зависимости от эксплуатационных характеристик диспетчерских участков», разработанной ОАО «РЖД», закону «О техническом регулировании». Предложен альтернативный вариант расчета, удовлетворяющий требованиям закона.

Ключевые слова: корректировка методики, допустимый риск, нормативные документы, расходы на перевозочный процесс, безопасность движения, оценка риска, единство измерений.

Summary

The article analyzes approaches to the method of calculating risks in dispatch areas. The inconsistency of some provisions of the «Methodology for normalizing the risk of traffic safety, depending on the operational characteristics of the dispatch areas», developed by JSC Russian Railways, by the law «On technical regulation», was found to be inconsistent. An alternative calculation option is proposed that meets the requirements of the law.

Keywords: method correction, permissible risk, regulatory documents, transportation process costs, traffic safety, risk assessment, measurement unity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-9-13

Согласно ст. 7 закона «О техническом регулировании» [1] к основным относятся 11 видов безопасности (ВБ1–ВБ11), среди которых ВБ11 — единство измерений. Естественно, что разрабатываемая нормативная документация в области оценки рисков должна строиться с учетом этого вида безопасности.

Вместе с тем в некоторых случаях данный принцип не соблюдается. Покажем это на примере анализа положений утвержденной в 2014 г. «Методики нормирования риска безопасности движения в зависимости от эксплуатационных характеристик диспетчерских участков» [2].

Расчет допустимого уровня рисков производился нами по формулам (1)–(6) методики [2]:

$$R_{\text{нбд}}^{\text{ду}} = \varphi \cdot R_{\text{нбд}}^{\text{этал}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{нбд}}^{\text{ду}}$ и $R_{\text{нбд}}^{\text{этал}}$ — допустимый уровень риска для рассчитываемого и эталонного участка соответственно;

φ — коэффициент пересчета «издержек плюс» на рассчитываемом диспетчерском участке по сравнению с эталонным, определяемый как

$$\varphi = \frac{I_{\text{ду}}}{I_{\text{ду}}^{\text{этал}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{ду}}$ — условный доход от перевозочной деятельности в границах диспетчерского участка, руб.;

$I_{\text{ду}}^{\text{этал}}$ — доход от перевозочной деятельности на эталонном участке, руб.;

допустимый уровень риска для эталонного участка рассчитывается по формуле

$$R_{\text{нбд}}^{\text{этал}} = f_{\text{нбд}}^{\text{эду}} \cdot E_{\text{нбд}}^{\text{этал}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{нбд}}^{\text{эду}}$ — частота транспортных происшествий на эталонном диспетчерском участке;

$E_{\text{нбд}}^{\text{этал}}$ — допустимый удельный ущерб на эталонном участке, тыс. руб.;

величины $f_{\text{нбд}}^{\text{эду}}$, $E_{\text{нбд}}^{\text{этал}}$ и $I_{\text{ду}}^{\text{этал}}$ вычисляются следующим образом:

$$f_{\text{нбд}}^{\text{эду}} = \frac{K_{\text{нбд}}^{\text{сеть}}}{N \cdot T}; \quad (4)$$

$$E_{\text{нбд}}^{\text{этал}} = I_{\text{ду}} \cdot Y_{\text{нбд}}^{\text{сеть}}; \quad (5)$$

$$I_{\text{ду}}^{\text{этал}} = \frac{D_{\text{сеть}}}{N}, \quad (6)$$

где $K_{\text{нбд}}^{\text{сеть}}$ — количество нарушений безопасности движения (НБД) на железных дорогах сети ОАО «РЖД» за рассматриваемый год;

N — количество диспетчерских участков на сети ОАО «РЖД», ед.;

T — временной измеритель;

$Y_{\text{нбд}}^{\text{сеть}}$ — отношение суммарных потерь от НБД к доходам от перевозочной деятельности по железным дорогам сети ОАО «РЖД»;

$D_{\text{сеть}}$ — доходы от перевозочной деятельности по сети ОАО «РЖД» за год, руб.

В качестве условного дохода от перевозочной деятельности на диспетчерском участке в методике [2] применяется показатель, который рассчитывается для диспетчерского участка в границах конкретной железной дороги согласно принципу «издержки плюс» по формуле

$$I_{\text{ду}} = \sum N_{\text{ду}}^k \cdot \left(1 + \frac{r}{100}\right) a_{\text{ду}}^k, \quad (7)$$

где $\sum N_{\text{ду}}^k$ — общий пробег k -го вида поездов (грузовых, пассажирских, пригородных), проследовавших по диспетчерскому участку с соответствующим видом тяги (электрической, тепловозной) за период наблюдения (например, 1 год), поезд-км;

r — рентабельность от перевозочной деятельности, %;

$a_{\text{ду}}^k$ — расходная ставка на 1 поезд-км в k -м виде движения, определяемая для соответствующего вида тяги в пределах конкретной железной дороги, руб./поезд-км.

Помимо допустимого уровня рисков для всех транспортных происшествий на участке, определяется допустимый уровень рисков по второй и третьей группам событий исходя из среднесетевого распределения ущерба по группам событий. Согласно методике [2]:

к первой группе относятся крушения и аварии, имеющие катастрофические последствия;

ко второй (в соответствии с п. 4 приказа Минтранса России № 163 от 25.12.2006 г.) — события, условный удельный ущерб от возникновения которых более чем на порядок превышает условный удельный ущерб от других видов транспортных происшествий или событий;

к третьей — все остальные виды транспортных происшествий и событий.

Таким образом:

$$E_{\text{нбд}}^{\text{ду}} = \varphi \cdot I_{\text{ду}}^{\text{этал}} \cdot Y_{\text{нбд}}^{\text{сеть}} \cdot \bar{w}_i = \varphi \cdot E_{\text{нбд}}^{\text{этал}}; \quad (8)$$

$$E_{\text{нбд}}^{\text{ду}} = E_{\text{нбд}}^{\text{ду}} \cdot \bar{w}_i, \quad (9)$$

где $E_{\text{нбд}}^{\text{ду}}$ — допустимый условный ущерб от всех видов транспортных происшествий и событий для диспетчерского участка, руб.;

\bar{w}_i — средневзвешенная за четырехлетний период доля условного ущерба от i -й группы транспортных происшествий и событий (разбиение на группы и расчет доли приведены в [2]).

Разработчики методики [2] считают, что условный доход от перевозочной деятельности на участке, рассчитанный по формуле (7), в какой-то мере соответствует доходам от перевозочной деятельности на этом диспетчерском участке. Покажем, что ошибка составляет от 400 до 1000 %. Она обусловлена тем, что в ОАО «РЖД» расходные ставки 1 поезд-км по движению носят внутризкономический характер и не соответствуют понятию «расходы на поезд-км», в котором «расходы» означают «все расходы на поезд-км» в среднем по филиалу ОАО «РЖД» или в среднем по сети [3, 4].

Указанное несоответствие понятий и нарушает принцип единства измерений, поскольку для определения допустимого риска на эталонном участке и далее на фактическом используются одни единицы доходности, а для определения фактического — единицы, не соответствующие им.

Выполним сравнительную оценку доходности на 1 поезд-км и расходных ставок на примере Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД). Данные по укрупненным расходным ставкам на 2015 г. и объемам работы приведены в соответствии с [3, 5]. Средняя величина (по видам движения с учетом объемов работ) укрупненной расходной ставки на 1 поезд-км A составляет 200 руб., что следует из данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Расходные ставки на 1 поезд-км и объемы работ на Северо-Кавказской железной дороге

| Вид движения | Вид тяги | Стоимость 1 поезд-км, руб. | Объем работ в 2015 г., поезд-км |
|--------------|---------------|----------------------------|---------------------------------|
| Грузовое | Электрическая | 206 | 33801138 |
| Грузовое | Тепловозная | 462 | 8733143 |
| Пассажирское | Электрическая | 137 | 25473270 |
| Пассажирское | Тепловозная | 244 | 1666867 |
| Пригородное | Электрическая | 138 | 7635739 |
| Пригородное | Тепловозная | 173 | 217560 |
| Всего | | | 77527717 |

Единицу доходности (руб./поезд-км) определим как

$$E_{\text{д}} = D/P, \quad (10)$$

где D — доход от перевозочной деятельности, тыс. руб.;

P — суммарный поездоборот, поезд-км.

Согласно [6], в 2015 г. доходность по СКЖД составила 59 735 млн руб., в соответствии с (10) получаем:

$$E_d = 59735/77,527717 \approx 770 \text{ руб./поездо-км.} \quad (11)$$

Используя (11), вычислим отношение единиц:

$$E_d/A = 770/200 \approx 3,8. \quad (12)$$

Подставляя фактические данные по доходам и поездобороту, получаем, что единица доходности составляет 770 руб./поездо-км, а расходная ставка с учетом рентабельности 3 % — 206 руб./поездо-км, что наглядно показывает нарушение принципа единства измерений в данном варианте методики [2].

Оценим соотношение единицы доходности и укрупненной расходной ставки в целом по сети. В соответствии с [6] доход по перевозочным видам деятельности составляет 1358 млрд руб., общий поездоборот — 1 млрд поезд-км, средняя укрупненная расходная ставка по сети может оцениваться в 300 руб./поездо-км (эта величина зависит от размера полигона тепловозной тяги).

Подставляя в (10) сетевые данные, получаем, что единица доходности составляет $1358 \cdot 10^9 / 10^9 = 1358$ руб./поездо-км и превышает расходную ставку более чем в 4,5 раза. Ниже показано, что для некоторых железных дорог это отношение может достигать 9–10 раз.

Несоответствие единиц приводит к следующему: допустимые риски по диспетчерским участкам, вычисленные по (1), оказываются кратно ниже, чем на самом деле, что дает искаженную картину при сравнении фактических рисков с допустимыми на конкретных диспетчерских участках и приводит к неверному результату оценки рисков (табл. 2) [5].

Тем не менее для отдельных участков возможно случайное соответствие методике [2], что связано со второй ошибкой ее разработчиков: при оценке фактических рисков используются не фактические данные по ущербам, а среднеэталонное значение 25,2 тыс. руб. на 1 случай.

Как видно из табл. 3, где приведены сравнительные данные по удельным ущербам на 1 НБД для диспетчерских участков Ростовского района управления, лишь в двух случаях (Лиховской и Котельниковский участки) можно говорить о случайном выполнении принципа единства измерений, поскольку для них соотношение контрольных величин близко к 100 % (75 и 92 % соответственно).

Таблица 2

Допустимые и фактические риски по диспетчерским участкам Ростовского района управления (РУ-1)
Северо-Кавказской железной дороги

| № п/п | Участок | Допустимый риск РУ-1 | Фактический риск 3-й группы (по методике [2]) | Уровень риска |
|-------|-----------------|----------------------|---|---------------|
| 1 | Северный | $2,05 \cdot 10^{-2}$ | $5,18 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 2 | Морозовский | $1,98 \cdot 10^{-2}$ | $2,01 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 3 | Лиховской узел | $6,68 \cdot 10^{-3}$ | $2,88 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 4 | Каменоломенский | $1,40 \cdot 10^{-2}$ | $5,75 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 5 | Марцевский | $4,78 \cdot 10^{-3}$ | $1,15 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 6 | Ростовский узел | $1,31 \cdot 10^{-2}$ | $2,01 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 7 | Батайский узел | $3,80 \cdot 10^{-3}$ | $1,44 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 8 | Сальский | $1,22 \cdot 10^{-2}$ | $4,60 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |
| 9 | Котельниковский | $1,44 \cdot 10^{-2}$ | $2,88 \cdot 10^{-2}$ | Недопустимый |

Таблица 3

Сравнительные данные по удельным ущербам на 1 НБД для диспетчерских участков Ростовского района управления

| № п/п | Участок | Фактический удельный ущерб на 1 НБД | Эталонный удельный ущерб на 1 НБД | Соотношение эталонного и фактического ущерба | Отклонение от заданной величины (3,8), % |
|-------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| 1 | Северный | 15,83 | 25,2 | 1,59 | 32 |
| 2 | Морозовский | 3,07 | 25,2 | 8,21 | 206 |
| 3 | Лиховской узел | 7,82 | 25,2 | 3,22 | 75 |
| 4 | Каменоломенский | 14,75 | 25,2 | 1,71 | 35 |
| 5 | Марцевский | 4,46 | 25,2 | 5,65 | 139 |
| 6 | Ростовский узел | 12,72 | 25,2 | 1,98 | 42 |
| 7 | Батайский узел | 87,38 | 25,2 | 0,29 | 2 |
| 8 | Сальский | 20,2 | 25,2 | 1,25 | 23 |
| 9 | Котельниковский | 6,52 | 25,2 | 3,87 | 92 |

Для большей наглядности на рис. 1 представлены данные табл. 3 в графическом виде, а на рис. 2 — результаты расчета риска для тех же участков (согласно [7] и с учетом методов оценки показателей процессного подхода к управлению рисками [8]), но при использовании фактических значений удельного ущерба [6].

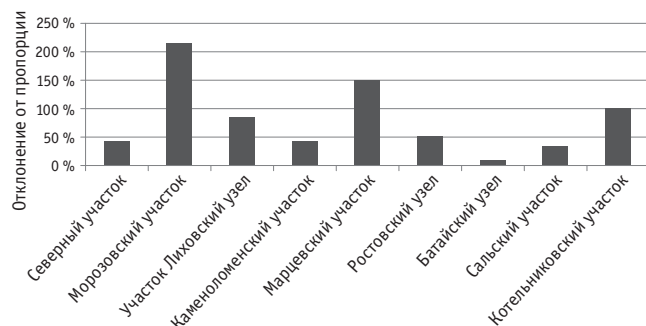


Рис. 1. Коэффициент отклонения от принципа единства измерений

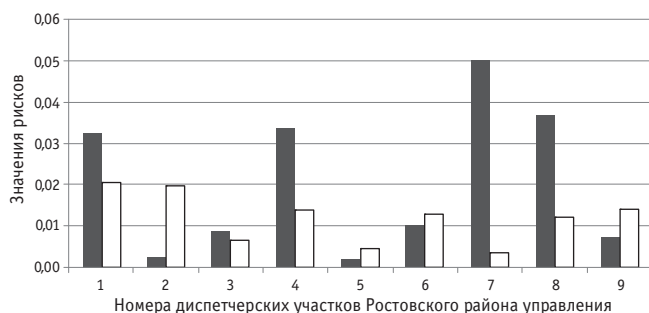


Рис. 2. Результаты расчета риска по диспетчерским участкам Ростовского районного управления с применением среднего удельного значения ущерба на одно событие по сети:
■ — уровень фактического риска; □ — уровень допустимого риска

Для железных дорог — филиалов ОАО «РЖД» единицы доходности иллюстрируются диаграммой на рис. 3.

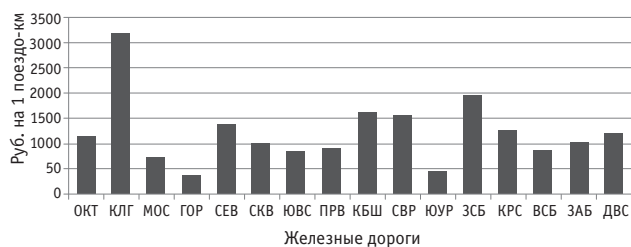


Рис. 3. Единицы доходности на 1 поезд-км в грузовом движении для железных дорог — филиалов ОАО «РЖД»

Как показывает сравнение величин доходности и единичной укрупненной ставки расходов, для некоторых дорог применение таких единиц приведет к отклонению нормированного риска по отношению к обоснованной величине в 10 раз (Западно-Сибирская железная дорога) и 7,5 раза (Куйбышевская и Свердловская дороги).

Все вышеизложенное позволяет говорить о необходимости корректировки методики [2]. Возможны два варианта изменения методики [2].

Первый вариант: при расчете доходов от перевозочной деятельности на фактических диспетчерских участках и оценке для них допустимого риска использовать единицы доходности поезд-км, вычисленные в среднем для железной дороги — филиала ОАО «РЖД». Тогда параметры риска и допустимого риска для эталонного и фактического диспетчерских участков будут рассчитаны в одних единицах.

Второй вариант: вместо условной доходности на эталонном диспетчерском участке при расчете допустимого риска использовать прямые расходы на перевозочный процесс и, следовательно, хорошо отработанные укрупненные расходные ставки на 1 поезд-км в различных видах движения и тяги. Предлагаемый алгоритм расчета носит название «издержки +». В этом случае также не будет противоречия между единицами измерения экономической составляющей рисков, однако определяющие соотношения потребуют некоторой корректировки.

Ввиду неоднозначности выбора варианта корректировки естественно установить, какой из них больше подходит для практического использования. С этой целью рассмотрим определяющие соотношения первого и второго подходов.

Для первого подхода сохраняются соотношения (1)–(6) и (8). Формула (7) приводится к виду

$$I_{\text{ду}} = \sum N_{\text{ду}}^k \cdot \frac{1+r}{100} \cdot d_{\text{ду}}^k, \quad (13)$$

где $d_{\text{ду}}^k$ — доходность одного поезд-км в k -м виде движения.

Во втором подходе неизменны формулы (1), (3)–(5), (7), (8). В формуле (2) изменилось содержание показателя $I_{\text{ду}}^{\text{этал}}$:

$$\varphi = \frac{I_{\text{ду}}}{I_{\text{ду}}^{\text{этал}}}, \quad (14)$$

где $I_{\text{ду}}^{\text{этал}}$ — прямые расходы на перевозочную деятельность на эталонном участке, рассчитываемые по схеме «издержки +» через усредненные укрупненные ставки на 1 поезд-км.

Формула (6) будет выглядеть следующим образом:

$$I_{\text{ду}}^{\text{этал}} = \frac{I_{\text{сеть}}}{N}, \quad (15)$$

где $I_{\text{сеть}}$ — прямые расходы на перевозочную деятельность по сети, также рассчитываемые по схеме «издержки +».

Анализ соотношений (13)–(15) показывает, что расчет по формулам (14) и (15) гораздо проще, чем по формуле (13), так как доходность от перевозочного процесса на конкретном диспетчерском участке — достаточно сложно вычисляемая величина, поскольку требует учета:

вида перевозимого груза и тарифов его перевозки (для грузового движения);

тарифа пассажирских перевозок на диспетчерском участке, а также данных по проценту заполненности поездов как дальнего, так и местного следования, которые являются

неструктурированными и вычисляются с целым рядом допущений. А использование показателя среднестрожной доходности может привести к значительным ошибкам, что связано с различной специализацией и классами диспетчерских участков.

То есть для практического применения более пригоден второй вариант. Критерием выбора в данном случае является простота в формировании и использовании единиц: алгоритм вычисления единиц условной доходности на фактическом дис-

петчерском участке и объем данных для такого вычисления несопоставимо сложнее, чем использование готовых единиц укрупненных расходных ставок, данными по которым располагают управления филиалов ОАО «РЖД».

В соответствии с принципом открытости системы менеджмента безопасности [9] приведенный в статье анализ может быть полезен для совершенствования нормативной документации в области рисков и уточнения оценок рисков.

Литература

1. О техническом регулировании : федер. закон Рос. Федерации от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ (в ред. от 13.07.2015 г.).
2. Методика нормирования риска безопасности движения в зависимости от эксплуатационных характеристик диспетчерских участков : утв. ОАО «РЖД» 27.11.2014 г. М. : ОАО «РЖД», 2014.
3. Единичные и укрупненные расходные ставки для использования в экономических задачах ОАО «РЖД». М. : ОАО «РЖД», 2014. 18 с.
4. Экономика железнодорожного транспорта : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. Н. П. Терешиной, Б. М. Лapidуса, М. Ф. Трихункова. М. : УМЦ ЖДТ, 2006. С. 318–319.
5. Методика оценки показателей процессов, влияющих на безопасность движения, на основе оценки рисков : СТО ОАО «РЖД» ; принята 08.11.2011 г. М. : ОАО «РЖД», 2011. 25 с.
6. Протокол Итогового за 2015 год заседания ОАО «РЖД». М. : ОАО «РЖД», 2015. 140 с.
7. Вережкина О. И. О результатах применения методики нормирования рисков на участках диспетчерского управления Краснодарского и Минераловодского районов управления Северо-Кавказской железной дороги // Вестник РГУПС. 2015. № 4 (60). С. 72–79. ISSN 0201-727X.
8. Вережкина О. И. Методы оценки показателей процессного подхода к управлению рисками в обеспечении безопасности движения // Вестник РГУПС. 2015. № 1 (57). С. 76–81. ISSN 0201-727X.
9. Положение о создании системы менеджмента безопасности движения в холдинге «РЖД» и осуществление деятельности в сфере менеджмента безопасности движения с учетом Функциональной стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2009 г. № 2608р [Электронный ресурс]. URL: <https://jd-doc.ru/2009/dekabr-2009/7098-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-17-12-2009-n-2609r> (дата обращения: 26.06.2017).

References

1. O tekhnicheskom regulirovanii : feder. zakon Ros. Federatsii ot 27.12.2002 g. № 184-FZ (v red. ot 13.07.2015 g.) [On technical regulation : Federal Law of Russian Federation of Dec. 27, 2002 No. 184-FZ (as amended on July 13, 2015)].
2. Metodika normirovaniya riska bezopasnosti dvizheniya v zavisimosti ot ekspluatatsionnykh kharakteristik dispetcherskikh uchastkov [Methodology for normalizing the risk of traffic safety, depending on the operational characteristics of the dispatch areas] : utv. OAO «RZhD» 27.11.2014 g. M. : OAO «RZhD», 2014.
3. Edinichnye i ukрупnennye rashodnye stavki dlya ispol'zovaniya v ekonomicheskikh zadachakh OAO «RZhD» [Single and consolidated expenditure rates for use in the economic objectives of JSC Russian Railways]. M. : OAO «RZhD», 2014. 18 s.
4. Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta [Economics of railway transport] : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. / Pod red. N. P. Tereshinoy, B. M. Lapidusa, M. F. Trikhunkova. M. : UMTs ZhDT, 2006. S. 318–319.
5. Metodika otsenki pokazateley protsessov vliyayushchikh na bezopasnost' dvizheniya, na osnove otsenki riskov [Methodology for assessing the indicators of processes that affect traffic safety, based on risk assessment] : STO OAO «RZhD» ; prinyata 08.11.2011 g. M. : OAO «RZhD», 2011. 25 s.
6. Protokol Itogovogo za 2015 god zasedaniya OAO «RZhD» [Protocol of JSC Russian Railways Final Meeting for 2015]. M. : OAO «RZhD», 2015. 140 s.
7. Verevkina O. I. O rezul'tatakh primeneniya metodiki normirovaniya riskov na uchastkakh dispetcherskogo upravleniya Krasnodarskogo i Mineralovodskogo rayonov upravleniya Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi [Results of application method of procedure risk areas normalization at Krasnodar and Mineralnye Vody management area and North Caucasus Railway] // Vestnik RGUPS. 2015. № 4 (60). S. 72–79. ISSN 0201-727X.
8. Verevkina O. I. Metody otsenki pokazateley protsessnogo podkhoda k upravleniyu riskami v obespechenii bezopasnosti dvizheniya [Estimation methods of indicators of process approach to management risks in movement safety] // Vestnik RGUPS. 2015. № 1 (57). S. 76–81. ISSN 0201-727X.
9. Polozhenie o sozdanii sistemy menedzhmenta bezopasnosti dvizheniya v kholdinge «RZhD» i osushchestvlenie deyatel'nosti v sfere menedzhmenta bezopasnosti dvizheniya s uchetom Funktsional'noy strategii obespecheniya garantirovannoy bezopasnosti i nadezhnosti perevozochnogo protsesssa : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 17.12.2009 g. № 2608r [Provision on the establishment of a traffic safety management system in the Russian Railways holding company and implementation of activities in the field of traffic safety management, taking into account the Functional Strategy for Ensuring Security and Reliability of the Transport Process : by the order of JSC Russian Railways of Dec. 17, 2009 No. 2608r]. [Electronic resource]. URL: <https://jd-doc.ru/2009/dekabr-2009/7098-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-17-12-2009-n-2609r> (access date: 26.06.2017).

УДК 004.896+681.5.08+656:25

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Дмитрий Владимирович Седых, главный инженер группы компаний «ИМСАТ», Санкт-Петербург, Россия,

Михаил Аркадьевич Гордон, главный специалист института «Гипротрансигналсвязь» — филиала АО «Росжелдорпроект», Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Dmitriy Viktorovich Efanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation and Telemechanics on the Railway Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Dmitriy Vladimirovich Sedykh, Chief Engineer, Group of companies «IMSAT», St. Petersburg, Russia,

Mikhail Arkadyevich Gordon, Chief Specialist, Institute Giprottranssignalsvyaz — the branch office of JSC Roszheldorproject, St. Petersburg, Russia

Features of design automation of hardware for analog signals health monitoring in railway signaling devices

Аннотация

Статья посвящена проблеме автоматизации проектирования технической документации систем непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Описаны стадии проектирования аппаратных средств мониторинга, предложено решение по автоматизации данного процесса на основе использования отраслевого формата технической документации на устройства ЖАТ. В качестве примера рассмотрен разработанный алгоритм автоматизации проектирования аппаратных средств мониторинга рельсовых цепей.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, рельсовые цепи, система непрерывного мониторинга, аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля, автоматизация проектирования, отраслевой формат технической документации.

Summary

The paper is devoted to the problem of railway signaling devices health monitoring systems technical documentation design automation. Design stages of hardware monitoring means are adduced; the solution of this process automation based on use of branch format of technical documentation of railway signalling devices is offered. The alorythm of hardware means design automation is developed on the example of track circuit monitoring.

Keywords: railway signaling, track circuits, health monitoring system, hardware-software complex of supervisory check, design automation, branch format of technical documentation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-14-23

Для получения оперативной информации о состоянии устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и автоматизации тем самым ряда процессов их технического обслуживания на сети железных дорог ОАО «РЖД» внедряются системы непрерывного мониторинга [1–3]. В ходе эволюции этих систем произошло внушительное расширение их функциональных возможностей — от примитивных систем диспетчерского контроля, способных принимать и выдавать данные о получении только дискретной информации, до многофункциональных аналитических комплексов, обрабатывающих большие потоки информации и выдающих предупредительные сообщения о развивающихся неисправностях [4]. Таким образом, стал возможным переход к прогрессивной технологии обслуживания устройств ЖАТ по фактическому состоянию [5, 6].

Современные системы непрерывного мониторинга ЖАТ — это сложные аппаратно-программные комплексы, работа с которыми требует не только выделения часов трудового времени, но и создания специализированных бригад аналитиков данных в ситуационных центрах [7]. К тому же системы непрерывного мониторинга постоянно развиваются: создаются новые измерительные контроллеры, совершенствуются методы обработки данных, повышается надежность оборудования и т.д. [8–16].

Одна из важных задач развития таких систем — автоматизация функций проектирования [17]. Поскольку, как уже было отмечено, современные системы непрерывного мониторинга

устройств ЖАТ являются аппаратно-программными комплексами, то требуется проектирование и в аппаратной части, и в программной, а сам этот процесс является трудоемким и включает нескольких этапов. На первом этапе анализируются схемные решения, выбираются специализированные измерительные контроллеры, указываются места их подключения на принципиальных схемах ЖАТ, а также монтажные адреса. Полученная техническая документация служит руководством к действиям специалиста-монтажника измерительных контроллеров системы мониторинга (нижнего уровня), а также специалиста-проектировщика программной оболочки анализа и отображения диагностической информации (верхнего уровня). В настоящее время процесс проектирования выполняется вручную либо самими разработчиками систем мониторинга, либо специалистами проектных институтов (например, АО «Росжелдорпроект»).

Основные системы непрерывного мониторинга устройств ЖАТ, действующие на железных дорогах Российской Федера-

ции, описаны в [3]. Однако в целом процесс проектирования, а вследствие этого и автоматизация проектирования не зависят от системы непрерывного мониторинга, отличаться могут только применяемое оборудование и его характеристики. Рассмотрим подробнее задачу автоматизации проектирования систем непрерывного мониторинга устройств ЖАТ.

СТАДИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Стадии проектирования систем мониторинга (рис. 1 и 2) включают в себя проектирование аппаратных и проектирование программных средств. Программные средства проектируют разработчики систем непрерывного мониторинга, а аппаратные средства — специалисты институтов по проектированию систем автоматики, телемеханики и связи. При этом для проектировщика программных средств исходными являются данные, предоставленные разработчиком проектных решений аппаратных средств.



Рис. 1. Структура проектирования аппаратных средств мониторинга устройств ЖАТ

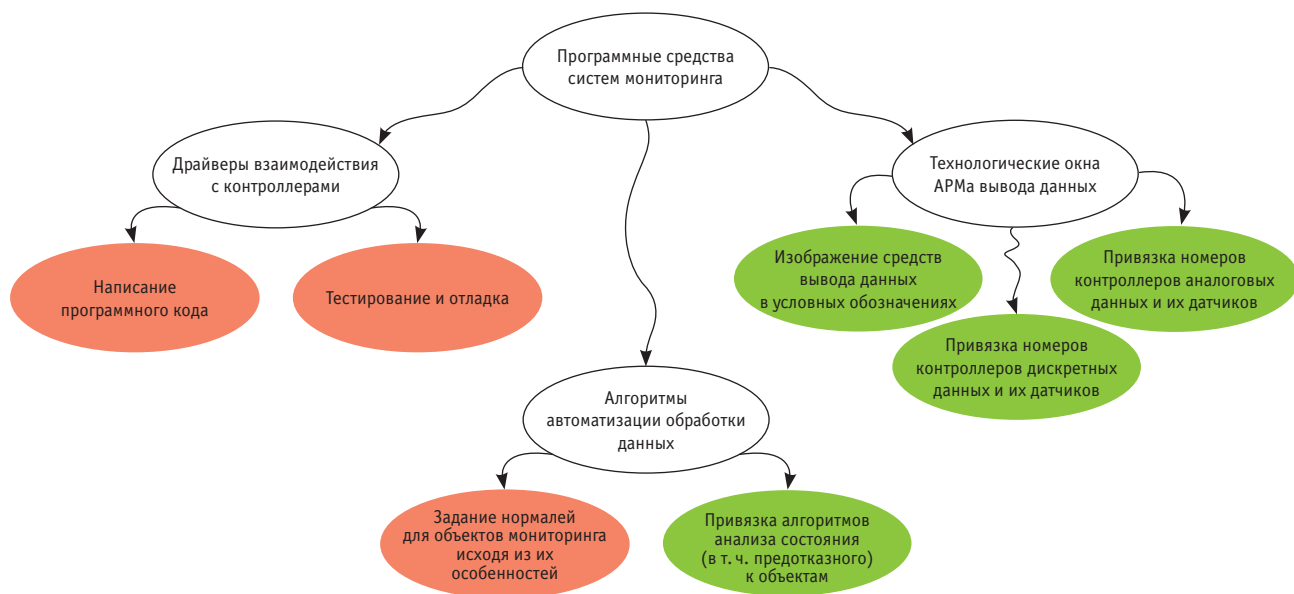


Рис. 2. Структура проектирования программных средств мониторинга устройств ЖАТ

На диаграммах (см. рис. 1 и 2) зеленым цветом выделены стадии проектирования, возможность автоматизации которых высока (свыше 70% работ), желтым — стадии, возможность автоматизации которых невелика (от 20 до 70%), красным — стадии, которые автоматизировать практически невозможно (менее 20%). Таким образом, как видно из обеих диаграмм, стадии проектирования и аппаратной, и программной составляющих могут быть в значительной степени автоматизированы.

ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

При проектировании участка, оборудуемого системой непрерывного мониторинга, можно выделить три группы чертежей:

- чертежи общей части системы;
- чертежи центрального поста;
- чертежи линейного пункта (для каждой станции участка свой комплект).

В комплект чертежей общей части системы входят структурная схема распределения частот автоматов контроля на участке и схема организации связи.

Комплект чертежей центрального поста включает:

- план расположения технологического оборудования системы мониторинга в здании центрального поста;
- схему соединения устройств мониторинга;
- схему локальной вычислительной сети;
- схему электропитания устройств мониторинга на центральном посту;
- комплектацию и монтажную схему шкафа системы мониторинга центрального поста.

Чертежи линейных пунктов участка можно условно разделить на чертежи станций и чертежи перегонов.

В связи с тем что документация по центральному посту системы мониторинга и по линиям связи составляет примерно 5% от всей документации при проектировании участка, обо-

рудуемого системой мониторинга, и в связи с тем что эти разделы автоматизировать сложно, остановимся только на автоматизации проектирования линейных пунктов.

При проектировании системы мониторинга на станциях и перегонах, оборудованных централизованной системой автоблокировки (АБ), комплект чертежей каждой станции и каждого перегона включает в себя:

- структурную схему линейного пункта;
- схему контроля аналоговых сигналов;
- схему контроля дискретных сигналов;
- таблицу сигналов телесигнализации (ТС);
- схему контроля тональных рельсовых цепей;
- схему контроля устройств электропитания (схему подключения устройств Альфа-А2, КДСП, АДСП, АДАМ-3014 и др.);
- схему увязки с различными устройствами (микропроцессорной централизацией, диспетчерской централизацией, УБП, ШУДГА, СЗИЦ-Д, ИСИ, ЭССО, СПД ЛП и др.);
- схему измерения сопротивления изоляции;
- схему контроля перегонных устройств;
- план расположения технологического оборудования системы мониторинга в здании поста ЭЦ или в транспортабельном модуле;
- схему электропитания станционных (перегонных) устройств системы мониторинга;
- комплектацию и монтажную схему шкафа системы мониторинга линейного пункта;
- принципиальные схемы станционных (перегонных) устройств ЖАТ с нанесенными местами подключения устройств мониторинга;
- монтажные схемы стивов и аппаратов управления.

При проектировании системы мониторинга на перегонах, оборудованных децентрализованной системой АБ, в комплект чертежей входят:

структурная схема распределения частот автоматов контроля на перегоне;

принципиальные схемы всех сигнальных и разрезных точек; схемы релейных шкафов переездов с указанием мест подключения автоматов контроля, измерителя тока и устройств измерения сопротивления изоляции;

монтажные схемы этих точек и релейных шкафов.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА АНАЛОГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

При проектировании системы непрерывного мониторинга на станциях и перегонах, оборудованных централизованной системой АБ, одной из основных задач является контроль аналоговых сигналов, в том числе сигналов от тональных рельсовых цепей [18, 19].

Рассмотрим пример автоматизации проектирования устройств диагностирования системы АПК-ДК производства ЗАО «МГП «ИМСАТ». В этой системе для контроля состояния тональных рельсовых цепей, фазочувствительных рельсовых цепей, аналоговых сигналов применяется один прибор — адаптер диагностики тональных рельсовых цепей (АДТРЦ) [3].

АДТРЦ содержит восемь независимых гальванически изолированных измерительных каналов с отдельными аналоговыми входами. Каждый канал настроен на один из следующих режимов:

широкополосный режим для измерения среднеквадратичного значения (СКЗ) напряжения амплитудно-манипулированных сигналов переменного тока при частоте манипулирующих импульсов 8 или 12 Гц или неманипулированных сигналов в полосе частот от 80 до 9000 Гц;

селективный режим для измерения СКЗ напряжения амплитудно-манипулированных сигналов переменного тока при частоте манипулирующих импульсов 8 или 12 Гц или неманипулированного сигнала переменного тока путем измерения напряжений отдельных гармонических составляющих сигналов (гармоник);

режим измерения напряжения постоянного тока.

На рис. 3 приведен алгоритм автоматизации процесса проектирования с применением электронного представления технической документации.

В основе автоматизации проектирования АПК-ДК лежит документация, представленная в отраслевом формате (ОФД) [20, 21]. В данном формате технический документ описывает не только визуальную часть чертежа, но и модель изображенного на ней элемента или схемы. При наличии набора схем (принципиальных или монтажных) можно построить модель, описывающую систему в целом, — специально разработанные алгоритмы позволяют создать такую обобщенную модель.

На первом этапе всю исходную документацию переводят в электронный вид в отраслевой формат или из базы данных берут действующую техническую документацию. При этом может применяться модуль распознавания документации [22].

Полученная модель содержит информацию обо всех приборах, используемых в схеме, их свойствах, связях с другими приборами и месте расположения в релейном помещении. На основании данных такой модели легко определяют места

для установки измерительных контроллеров АПК-ДК (как отмечалось ранее, в качестве таких приборов в настоящее время используют АДТРЦ). Причем если имеются монтажные схемы или принципиальные схемы с нанесенными монтажными адресами, то возможно и получение точных монтажных адресов для подключения измерительных устройств.

На втором этапе из комплекта документации выбирают схемы с рельсовыми цепями и в этих схемах определяют точки подключения оборудования:

для тональных рельсовых цепей — измерительные панели, подключенные к генератору, фильтру (если это предусмотрено техническим заданием), путевому приемнику и к путевому реле (рис. 4);

для фазочувствительных рельсовых цепей — измерительные панели, подключенные к путевым реле и лучам питания.

На третьем этапе полученный список сигналов диагностирования рельсовых цепей распределяют по адаптерам АДТРЦ. При этом учитывается, что к одному прибору можно подключить только восемь пар точек измерения, а для контроля фильтров, генераторов, приемников, путевых реле, лучей питания должны быть предусмотрены отдельные АДТРЦ. При группировке сигналов от диагностических приборов учитывается, что они должны располагаться на том же или соседнем стative, что и контролируемое устройство. Далее выбирают монтажные адреса АДТРЦ и защитных резисторов (блока защитных резисторов БЗР-2) и формируют схемы подключения АДТРЦ к приборам рельсовых цепей (рис. 5).

На четвертом этапе из комплекта документации выбирают схемы, на которых показаны схемы питания электрической централизации или централизованной АБ (схема межпанельных соединений, схема разводки внутрисетового питающего кабеля). В этих схемах находят полюса питания, мониторинг которых необходим. Далее эти полюса питания распределяют по АДТРЦ с учетом того, что к одному прибору можно подключить восемь пар точек измерения. При группировке сигналов от АДТРЦ учитывается, что адаптер должен располагаться на том же или соседнем стative, что и место подключения к полюсу питания. Затем выбирают монтажные адреса АДТРЦ и защитных резисторов (блока защитных резисторов БЗР-2), после чего формируют схемы подключения АДТРЦ к полюсам питания (рис. 6).

На пятом этапе определяют общее количество АДТРЦ. Адаптеры распределяют по магистралям таким образом, чтобы в одну магистраль могло подключаться до 32 адаптеров и она была по возможности короче. Далее на адаптеры устанавливают сетевые адреса, с учетом того что адаптер с первым сетевым адресом должен быть подключен к концентратору, а все остальные — последовательно к первому. Затем формируют схему обвязки АДТРЦ и подключения к концентратору (рис. 7).

На шестом этапе формируют схему электропитания АДТРЦ — либо от источника питания постоянного тока от 18 до 30 В, либо от источника переменного тока частотой 50 Гц от 15 до 24 В. К одному источнику питания допускается подключение 16 АДТРЦ. В зависимости от фактического числа приборов в одном луче питания выбирают номинал предохранителя.

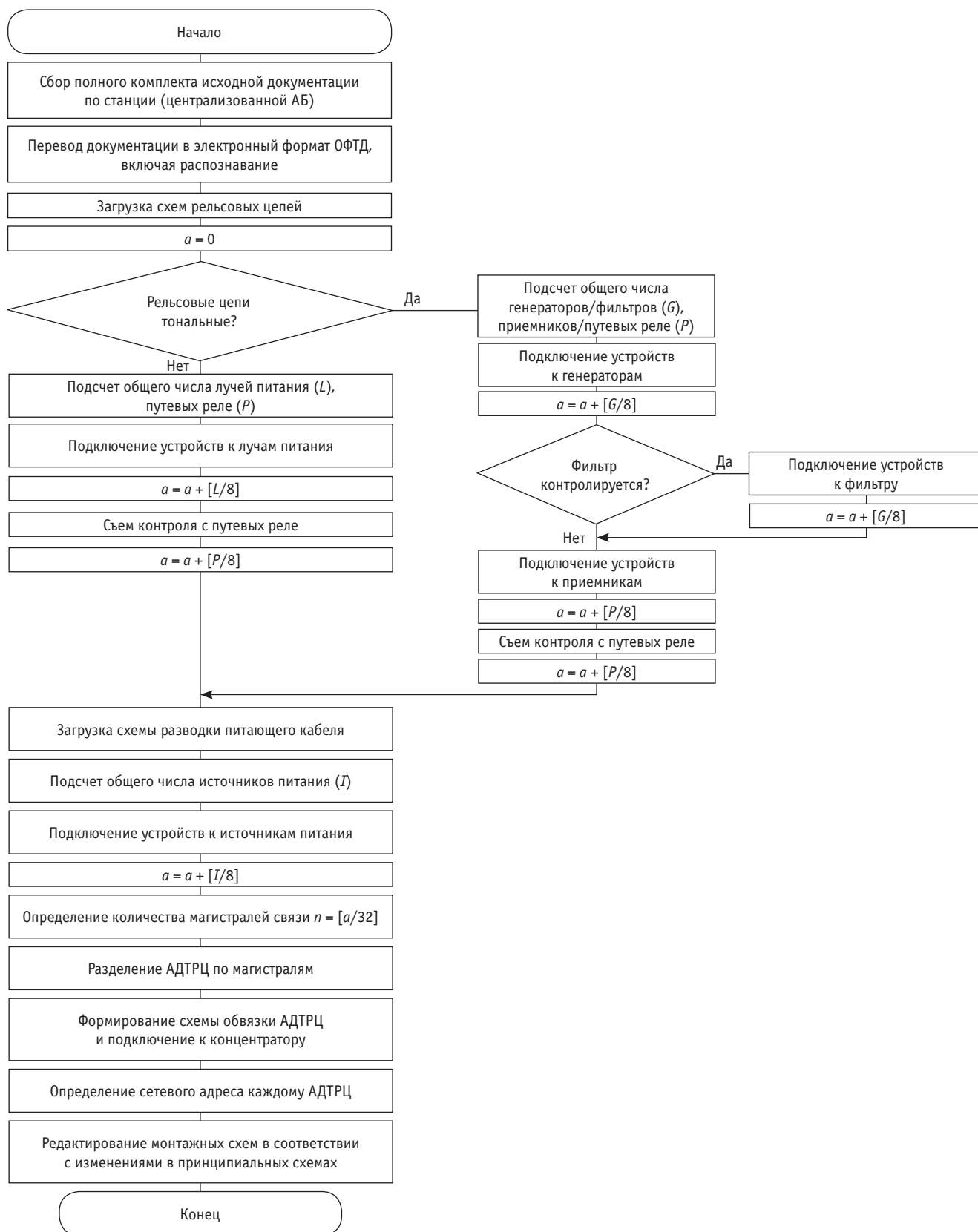


Рис. 3. Блок-схема алгоритма автоматизации проектирования средств мониторинга



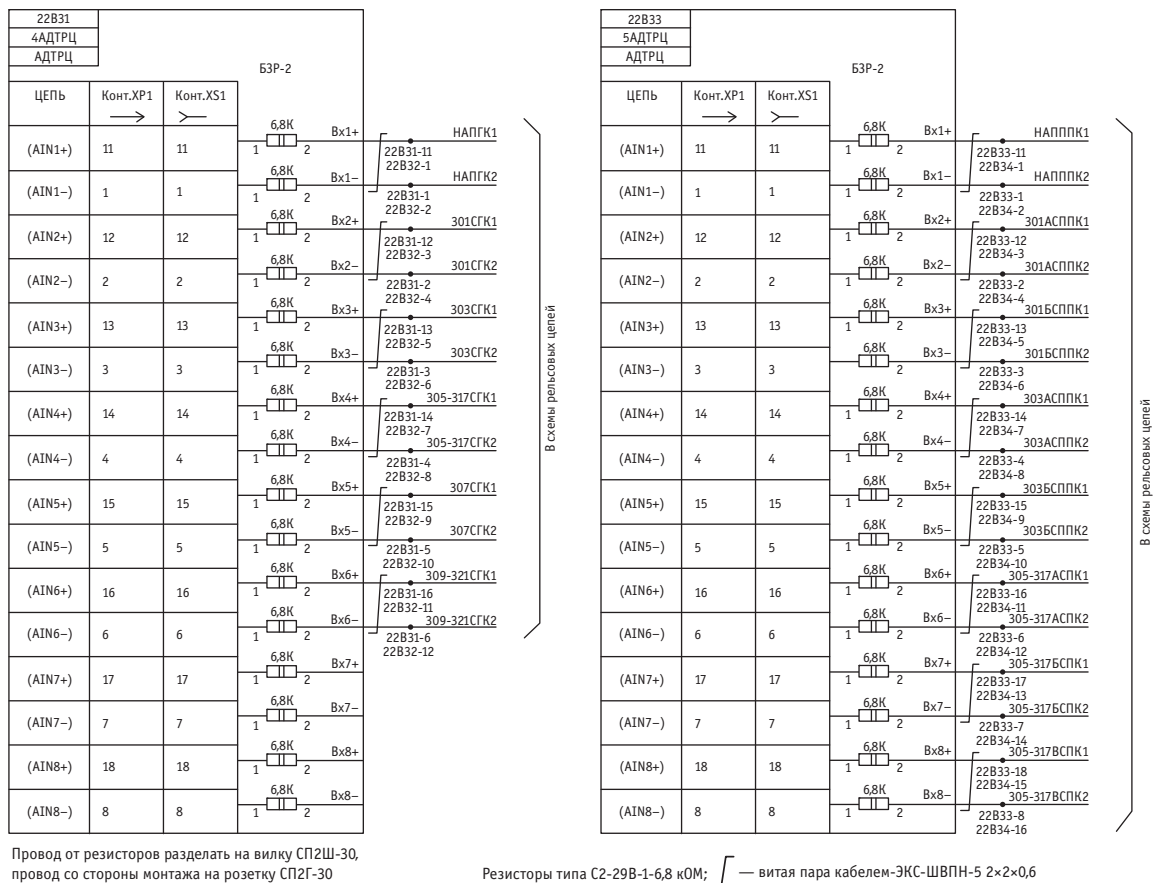


Рис. 5. Схемы подключения оборудования к приборам рельсовых цепей

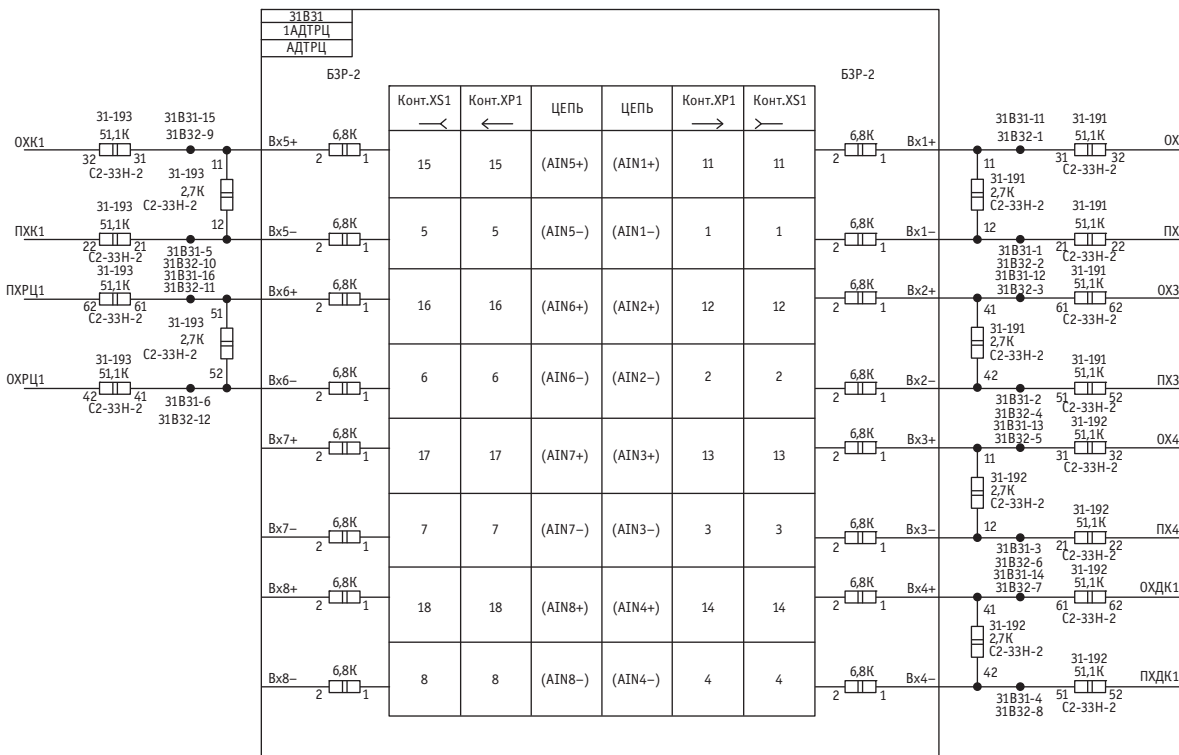


Рис. 6. Схемы подключения оборудования к полюсам питания

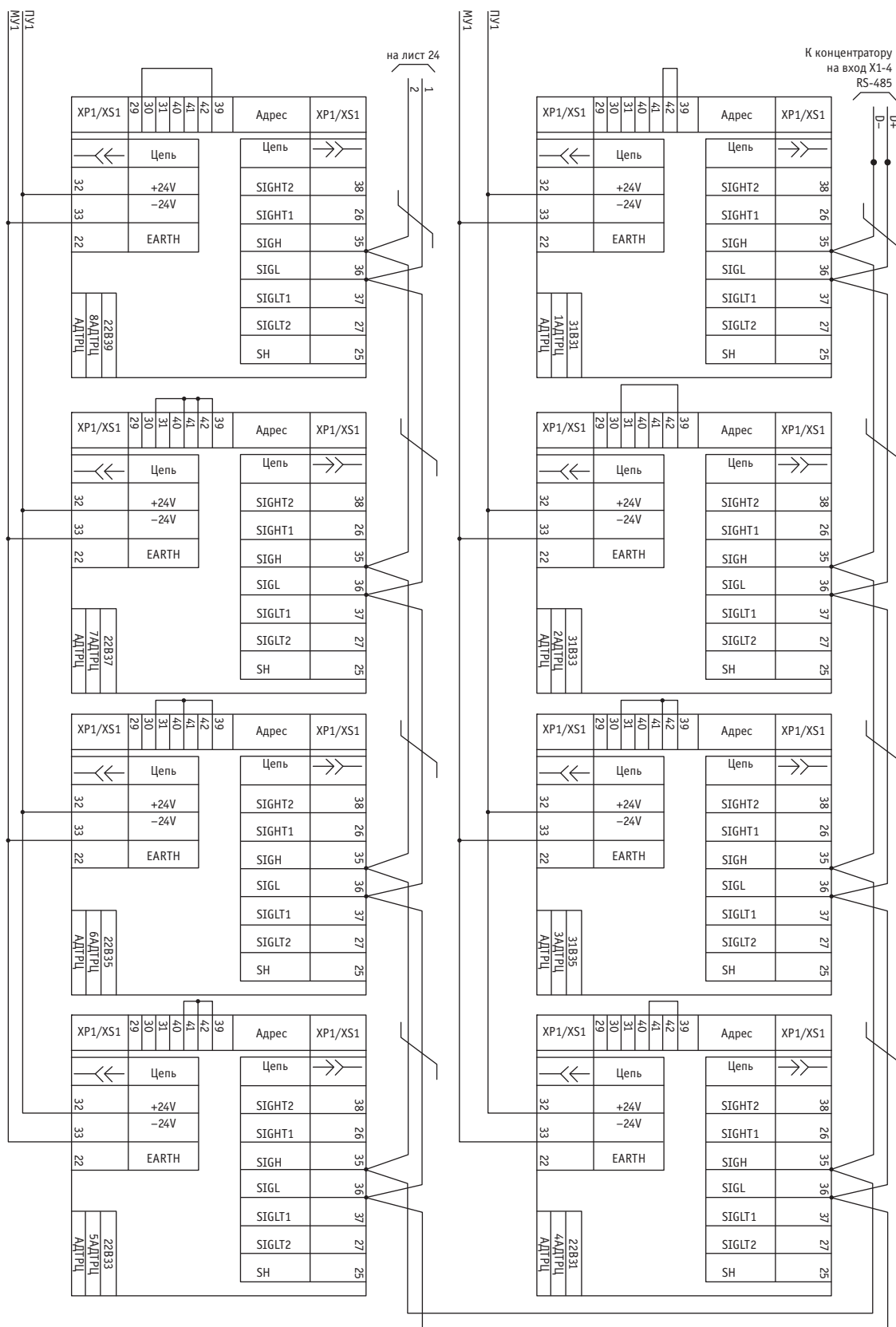


Рис. 7. Схема обвязки и подключения к концентратору

На седьмом этапе выполняют корректировку монтажной документации в соответствии с полученными принципиальными схемами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи автоматизации проектирования схемных решений аппаратных средств непрерывного мониторинга устройств ЖАТ — важный этап совершенствования самих систем мониторинга, поскольку сокращение ручного труда позволяет не только уменьшить время, расходуемое на данный процесс, и мини-

мизировать трудозатраты проектировщика, но и повысить качество проектирования.

Рассмотренная технология автоматизации проектирования на основе отраслевого формата технической документации при соответствующей доработке и адаптации в программное обеспечение систем автоматизации проектирования устройств ЖАТ (например, АРМ-ПТД) даст возможность проектным институтам и разработчикам систем мониторинга значительно сократить затраты на получение конечного продукта.

Литература

1. Федорчук А. Е., Сепетый А. А., Иванченко В. Н. Автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СЦБ). М. : УМЦ ЖДТ, 2013. 400 с.
2. Молодцов В. П., Иванов А. А. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие. СПб. : ПГУПС, 2010. 140 с.
3. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : моногр. СПб. : ПГУПС, 2016. 171 с.
4. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 124–148. ISSN 2412-9186.
5. Вотолевский А. Л. Проблемы и организационно-технические основы перехода к обслуживанию устройств ЖАТ «по состоянию» // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сб. докл. пятой междунар. науч.-практ. конф. «Транс ЖАТ-2010». Ростов н/Д, 2010. С. 89–97.
6. Вотолевский А. Л. АСУ и технологии обслуживания устройств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 10. С. 36–42. ISSN 0005-2329.
7. Москвина Е. А. Опыт организации ЦУСИ // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 9. С. 22–25. ISSN 0005-2329.
8. Горишний Д. В., Мамаев Э. А. Алгоритм выявления зависимостей между сбоями устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Наука и техника транспорта. 2010. № 2. С. 57–65. ISSN 2074-9325.
9. Ефанов Д. В. О методе выявления логических ситуаций в системах технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Вестник РГУПС. 2010. № 4 (40). С. 66–71. ISSN 0201-727X.
10. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. О достоверности фиксации предотказных состояний в системах непрерывного контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 2. С. 27–30. ISSN 0236-1914.
11. Волков А. А., Першин Д. С., Григорьев С. Н. Выявление предотказов стрелочных электроприводов // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 4. С. 16–18. ISSN 0005-2329.
12. Ефанов Д. В. Метод автоматизации проверки логики функционирования объектов диагностирования в системах удаленного контроля и мониторинга // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 58–62. ISSN 1815-9400.

References

1. Fedorchuk A. E., Sepetyy A. A., Ivanchenko V. N. Avtomatizatsiya tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT (sistema ADK-StsB) [Automation of technical diagnostics and monitoring of Railway Automatics and Telemechanics Devices (the System of Automatization of Diagnostics and of Device Control-StsB)]. M. : UMts ZhDT, 2013. 400 s.
2. Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : ucheb. posobie [Dispatching control and railway automation and remote control monitoring systems : textbook]. SPb. : PGUPS, 2010. 140 s.
3. Efanov D. V. Funktsional'nyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : monogr. [Concurrent checking and monitoring of railway automation and remote control devices : monograph]. SPb. : PGUPS, 2016. 171 s.
4. Efanov D. V. Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funktsional'nogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Becoming and development prospects of concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. S. 124–148. ISSN 2412-9186.
5. Votolevskiy A. L. Problemy i organizatsionno-tekhnicheskie osnovy perekhoda k obsluzhivaniyu ustroystv ZhAT «po sostoyaniyu» [Problems and organizational and technical foundations of the transition to maintenance of RAT devices «by the condition»] // Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte : sb. dokl. pyatoy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Trans ZhAT-2010». Rostov n/D, 2010. S. 89–97.
6. Votolevskiy A. L. ASU i tekhnologii obsluzhivaniya ustroystv ZhAT [ACS and railway automation and remote control devices maintenance technologies] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2011. № 10. S. 36–42. ISSN 0005-2329.
7. Moskvina E. A. Opyt organizatsii TsUSI [Experience of CUSI organization] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2013. № 9. S. 22–25. ISSN 0005-2329.
8. Gorishniy D. V., Mamaev E. A. Algoritm vyavleniya zavisimostey mezhdu sboyami ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Algorithm of dependencies between railway automation and remote control devices faults identification] // Nauka i tekhnika transporta. 2010. № 2. S. 57–65. ISSN 2074-9325.
9. Efanov D. V. O metode vyavleniya logicheskikh situatsiy v sistemakh tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [About the method for identifying logical situations in the systems for technical diagnostics and monitoring of the railway for automatics and telemechanics devices] // Vestnik RGUPS. 2010. № 4 (40). S. 66–71. ISSN 0201-727X.
10. Efanov D. V., Bogdanov N. A. O dostovernosti fiksatsii predotkaznykh sostoyaniy v sistemakh nepreryvnogo kontrolya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Reliability of registration of pre-failure condition in the systems for on-line control of the units belonging to railway control and telemechanics] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. № 2. S. 27–30. ISSN 0236-1914.
11. Volkov A. A., Pershin D. S., Grigoryev S. N. Vyavlenie predotkazov strelachnykh elektropriwodov [Detection of point machines prefaults] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2014. № 4. S. 16–18. ISSN 0005-2329.
12. Efanov D. V. Metod avtomatizatsii proverki logiki funktsionirovaniya ob'ektov diagnostirovaniya v sistemakh udalennogo kontrolya i monitoringa [Method for automated verification of operation logic of tested

13. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Новые приборы регистрации параметров устройств железнодорожной автоматики в системе АПК-ДК (СТДМ) // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1. № 3. С. 282–297. ISSN 2412-9186.
14. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 65–80. ISSN 2412-9186.
15. Ефанов Д. В. Организация технического диагностирования и мониторинга систем управления движением поездов на линиях Петербургского метрополитена // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 3. С. 364–390. ISSN 2412-9186.
16. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Техническое диагностирование устройств автоматики и телемеханики в метрополитенах // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 3. С. 391–412. ISSN 2412-9186.
17. Ефанов Д. В., Седых Д. В., Гордон М. А. Проблемы автоматизации проектирования систем диспетчерского контроля железнодорожной автоматики и телемеханики // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Транспортные системы: тенденции развития», 26–27 сент. 2016 г. М. : МИИТ, 2016. С. 625–626.
18. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 36–42. ISSN 1815-9400.
19. Антонов А. А., Бакин М. Е. Методика расчета уровня гармоник тягового тока в рельсовых цепях без изолирующих стыков // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 41–46. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-41-46. ISSN 1815-9400.
20. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 1. С. 14–16. ISSN 0005-2329.
21. Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А. Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Ч. 1. Концепция создания // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 1. С. 112–128. ISSN 2412-9186.
22. Седых Д. В., Матушев А. А. Методы распознавания структуры монтажных схем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 4. С. 552–563. ISSN 2412-9186.
- units in telemechanics and monitoring systems] // Transport Urala. 2014. № 3 (42). С. 58–62. ISSN 1815-9400.
13. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodtsov V. P. Novye pribory registratsii parametrov ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki v sisteme APK-DK (STDM) [New devices for registration of parameters of railway automation hardware within APK-DK (STDM) system] // Avtomatika na transporte. 2015. T. 1. № 3. S. 282–297. ISSN 2412-9186.
14. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodtsov V. P. Peredacha dannykh s ustroystv oborudovaniya pereezda apparatury APK-DK pri otsutstvii fizicheskoy linii i kruglosutochnogo dezhurstva [Data transmission from APK-DK devices of rail crossing under absence of physical link and clock duty] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. S. 65–80. ISSN 2412-9186.
15. Efanov D. V. Organizatsiya tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa sistem upravleniya dvizheniem poezdov na liniyakh Peterburgskogo metropolitena [Organization of technical diagnostics and monitoring of train control systems at Petersburg Metro lines] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 3. S. 364–390. ISSN 2412-9186.
16. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodtsov V. P. Tekhnicheskoe diagnostirovaniye ustroystv avtomatiki i telemekhaniki v metropolitenakh [Technical diagnostics of metro automation and remote control devices] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 3. S. 391–412. ISSN 2412-9186.
17. Efanov D. V., Sedykh D. V., Gordon M. A. Problemy avtomatizatsii proektirovaniya sistem dispetcherskogo kontrolya zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Problems of automating the design of dispatch control systems for railway automation and telemechanics] // Sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transportnye sistemy: tendentsii razvitiya», 26–27 sent. 2016 g. M. : MIIT, 2016. S. 625–626.
18. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Monitoring parametrov rel'sovykh tsepy tonal'noy chastoty [Monitoring of audio frequency track circuit parameters] // Transport Urala. 2013. № 1 (36). S. 36–42. ISSN 1815-9400.
19. Antonov A. A., Bakin M. E. Metodika rascheta urovnya garmonik tyagovogo toka v rel'sovykh tsepyakh bez izoliruyushchikh stykov [The methodology of calculation of the level of traction current harmonics in the jointless track circuits] // Transport Urala. 2016. № 4 (51). S. 41–46. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-41-46. ISSN 1815-9400.
20. Razvitiye elektronnoy dokumentooborota v khozyaystve AT [Development of electronic document management in automation and remote control] / M. N. Vasilenko, V. G. Trokhov, D. V. Zuev, D. V. Sedykh // Avtomatika, svyaz', informatika. 2015. № 1. S. 14–16. ISSN 0005-2329.
21. Sedykh D. V., Zuev D. V., Gordon M. A. Otrasleyevy format tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Ch. 1. Kontseptsiya sozdaniya [[Industry framework for technical documentation for railway automation and remote control devices. Part 1. Concept of design] // Avtomatika na transporte. 2017. T. 3. № 1. S. 112–128. ISSN 2412-9186.
22. Sedykh D. V., Matushev A. A. Metody raspoznavaniya struktury montazhnykh skhem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Methods of assembly diagrams structure recognition of railway automation and remote control] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 4. S. 552–563. ISSN 2412-9186.

УДК 625.096

Вадим Вадимович Ляной, аспирант, заместитель директора НПЦ «Промэлектроника»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ростислав Васильевич Гнитко, руководитель бюро перспективных исследований НПЦ «Промэлектроника»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА КОЛЕСА С ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ КОЛЕСОМ

Vadim Vadimovich Lyanoy, postgraduate student, Deputy Director of Research and Production Centre «Promelectronics»,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Rostislav Vasiliyevich Gnitko, Head of Bureau of Advanced Studies, Research and Production Centre «Promelectronics»,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Development of a simplified mathematical model for the interaction of the inductive wheel sensor with a railway wheel

Аннотация

Обеспечение надежной работы и расчет индуктивных датчиков регистрации прохода железнодорожного колеса (ИДК) до настоящего времени вызывают серьезные затруднения у разработчиков. Реборда колеса проходит над поверхностью чувствительного элемента ИДК в некотором продольном направлении X . При этом боковое отклонение Y и вертикальное отклонение Z относительно направления прохода колеса могут варьировать в достаточно широких пределах и, как следствие, приводить к пропуску регистрации проходящего над датчиком колеса. В то же время моделей для исследования допустимых отклонений Y и Z в научной литературе пока не существует.

В статье предлагается упрощенная математическая модель объемного взаимодействия ИДК с железнодорожным колесом, которая на этапе разработки документации дает возможность провести необходимые исследования и выбрать оптимальные параметры индуктора ИДК, что позволяет обеспечить требуемые показатели надежности работы ИДК и безопасность движения.

Ключевые слова: индуктивный датчик колеса, повышение надежности, безопасность движения, математическая модель.

Summary

Providing reliable operation and calculation of inductive sensors (IWS) for registering the passage of the railway wheel to date have caused serious difficulties for developers. The wheel flange extends over the surface of the IWS element in some longitudinal direction X . Here, the lateral deflection Y and the vertical deflection Z relative to the direction of the passage of the wheel can vary within a fairly wide range and, as a consequence, lead to a missing registration of the wheel passing over the sensor. At the same time, there are no models for studying the permissible deviations of Y and Z in the scientific literature.

The article proposes a simplified mathematical model of the IWS's volumetric interaction with the railway wheel, which, at the stage of documentation development, makes it possible to carry out the necessary studies and select the optimal parameters of the IWS inductor, which allows providing the required IWS safety performance and traffic safety.

Keywords: inductive wheel sensor, an increase of reliability, traffic safety, mathematical model.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-24-28

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существуют два способа изучения систем — по результатам натурных экспериментов и по их моделям. При разработке сложных объектов второй способ является единственно возможным, поскольку изготовление натурных образцов для проведения достаточно полных исследований связано со значительными затратами ресурсов и времени. Однако на практике сформировать модель S_2 , полностью изоморфную и по всем параметрам совпадающую с изучаемой системой S_1 , часто бывает весьма трудно.

Согласно теории моделирования [1], любая сложная система S может быть представлена конечным множеством упрощенных моделей, каждая из которых отражает определенные (не все) свойства системы S , но позволяет исследовать свойства, интересующие разработчиков. Упрощенные модели относительно независимы и занимают определенную часть пространства обобщенных моделей. Относительная независимость (автономность) моделей в теории выражается так называемым постулатом дополненности. В соответствии с этим постулатом можно разрабатывать упрощенные математические модели целевого назначения для исследования влияния на работу всей системы только конкретных параметров.

Попытаемся разработать упрощенную математическую модель объемного взаимодействия ИДК с железнодорожным колесом, которая позволила бы на этапе создания конструкторской документации выбрать оптимальные параметры индуктора ИДК и провести необходимые исследования области устойчивой работы ИДК во всем диапазоне возможных износов колеса и рельса, допускаемых нормативной документацией.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия железнодорожного колеса с индуктором электромагнитного поля индуктивного датчика регистрации прохода железнодорожного

колеса. Для проведения исследований и оптимизации параметров основных элементов датчика колеса (ДК) на этапе проектирования необходимо получить наиболее адекватную модель этой системы.

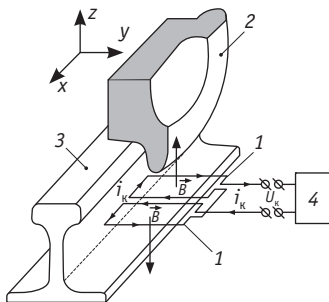


Рис. 1. Конструктивное расположение чувствительного элемента ДК, колеса и рельса:

1 — чувствительный элемент датчика (две согласно включенные и последовательно соединенные катушки индуктивности, расположенные в одной горизонтальной плоскости в области прохода реборды колеса); 2 — колесо железнодорожного транспортного средства; 3 — рельс; 4 — схема возбуждения и регистрации сигнала, возникающего при проходе колеса

В общем случае ДК могут рассматриваться как датчики приближения, которые в технической литературе описаны достаточно подробно [2, 3]. Однако аналитический расчет ИДК до настоящего времени вызывает затруднения [4, 5]. Это связано с особенностями и конструкции ИДК, и функционирования рассматриваемой системы. В такой системе регистрируемый объект (реборда колеса) проходит над поверхностью чувствительного элемента ИДК в некотором продольном направлении X , где боковое отклонение Y и вертикальное отклонение Z относительно направления прохода колеса могут варьировать в достаточно широких пределах. При составлении полной модели такой системы необходимо описать и воспроизвести работу электрической схемы, трехмерное электромагнитное поле (ЭМП) в зависимости от размеров и конструкции индукторов, его взаимодействие с ребордой колеса, реакцию схемы возбуждения индуктора на появление колеса в области этого ЭМП и как эта реакция зависит от частоты возбуждения индуктора и скорости прохода колеса над датчиком.

Описать такую систему в аналитическом виде, в виде обобщенной математической модели, на практике не представляется возможным. Причем наиболее сложно в обобщенной модели описать и представить функциональную зависимость выходного сигнала при проходе колеса от параметров индуктора и параметров Y и Z (см. рис. 1). Однако именно эти зависимости определяют надежность работы ИДК в реальных условиях эксплуатации при реальных износах колеса и рельса. Их исследование на этапе разработки документации имеет важное и принципиальное значение.

Представим аналитически функциональную зависимость выходного сигнала ИДК в системе, показанной на рис. 1, только от интересующих нас параметров, а именно от параметров индуктора ИДК, напряженности ЭМП над поверхностью ИДК и параметров X , Y и Z системы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ-ПОСТУЛАТЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

1. Уровень сигнала, выделяемого устройством 4 (см. рис. 1) в ДК, прямо пропорционален уровню напряженности ЭМП, с которым в каждый конкретный момент времени взаимодействует реборда и/или поверхность катания колеса.

2. В качестве индуктора ДК будем использовать плоские катушки индуктивности, для которых известны модуль напряженности ЭМП над его поверхностью (вычисляется в соответствии с [6] или определяется экспериментально по методике, изложенной в [7]) и функциональная связь между электрическими и конструктивными параметрами.

Для плоских катушек со средним диаметром D и сечением обмотки $b \times c$, где b и $c \ll D$ (рис. 2), значение индуктивности вычисляется по алгоритму с применением эллиптических интегралов Максвелла [6] по формуле

$$L = \frac{0,08 D^2 N^2}{3D + 9b + 10c}.$$

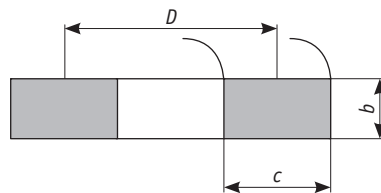


Рис. 2. Параметры применяемых катушек индуктивности

3. Модуль напряженности ЭМП и соответственно чувствительность ДК в направлении оси Z от поверхности катушек индуктора изменяется по экспоненциальному закону [2, 3] над всей их поверхностью и определяется зависимостью $F(Z) = e^{-(Z/a)}$, где параметр a для катушек данной конструкции будем определять по экспериментальным данным.

4. Объемная нормированная напряженность ЭМП над поверхностью катушек в условных единицах определяется произведением нормированной функциональной зависимости напряженности ЭМП по поверхности катушек (вдоль осей X и Y) и градиента функциональной зависимости напряженности этого ЭМП в направлении оси Z .

РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

1. Сначала опишем изменение напряженности ЭМП в направлении вдоль поверхности датчика по осям X и Y . На рис. 3 представлены диаграммы напряженности ЭМП для катушек индуктора диаметром 56 мм по мере удаления от их центра (оси симметрии) соответственно на расстоянии 6 и 20 мм от поверхности ДК*.

* На диаграммах по оси абсцисс показано расстояние вдоль поверхности катушек (в см), по оси ординат — модуль напряженности ЭМП (в условных единицах), нормированный относительно максимального значения.

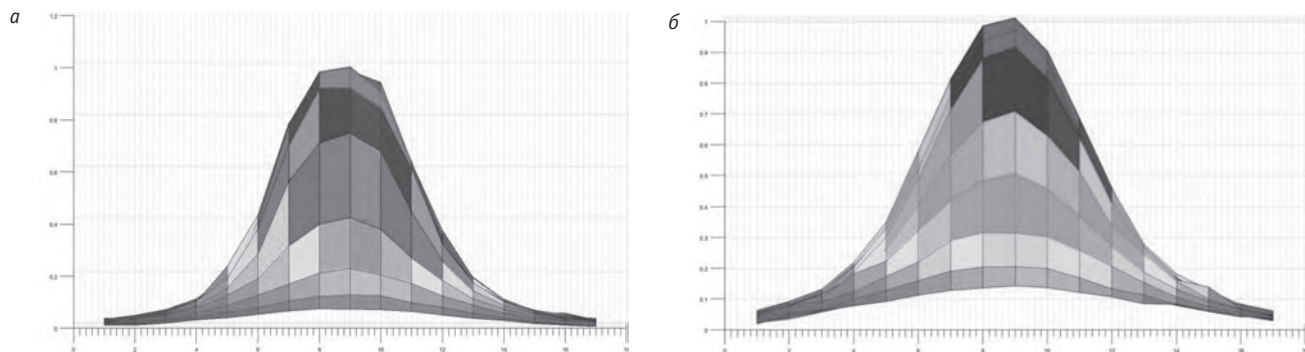


Рис. 3. Напряженность ЭМП катушек индуктора по мере удаления от их центра (оси симметрии) на расстоянии 6 мм (а) и 20 мм (б) от поверхности ДК

Из приведенных данных видно, что форма кривой модуля напряженности с изменением расстояния до поверхности катушек ДК меняется незначительно и с достаточной степенью точности может быть представлена функцией Гаусса. В связи с этим зависимость напряженности ЭМП над поверхностью ДК вдоль оси Y для координаты $X = 0$ (см. рис. 1) для известного диаметра катушки D в соответствии с экспериментально полученными данными опишем некой функцией Гаусса

$$F(Y) = \frac{k}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(Y-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

Здесь $\frac{k}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ — некоторый коэффициент пропорциональности, соответствующий каждому конкретному расстоянию до поверхности катушек. Для нормированной функции Гаусса примем его равным единице. Максимум функции $F(Y)_{\max}$ расположим над продольной осью симметрии датчика. То есть значение μ математического ожидания Y примем равным нулю. Средне-квадратическое отклонение σ этой функции определим из экспериментально полученных данных, приведенных на рис. 3, и свяжем его с диаметром катушки индуктивности датчика D .

Для функций, приведенных на рис. 3, величина σ составляет от 24 до 26 мм, или ≈ 25 мм, т.е. 0,446 от диаметра D катушек индуктивности. Для обеспечения надежной работы датчика необходимо задать допустимый уровень снижения сигнала при боковых смещениях реборды колеса по оси Y относительно продольной оси симметрии ДК. Примем его равным 30% от максимального значения напряженности ЭМП. Тогда в соответствии с рис. 3 предельное отклонение реборды колеса от продольной оси симметрии ДК, при котором датчик будет устойчиво работать, составит $(82 \div 70)$ мм/56 мм от среднего диаметра катушек индуктора, или $\approx 1,36 D$. А нормированная функция Гаусса по оси Y примет вид

$$F(Y) = 1 \cdot e^{-\frac{(Y)^2}{2(\sigma)^2}}, \text{ или } e^{-\frac{(Y)^2}{2(0,446D)^2}}. \quad (2)$$

2. Вдоль оси X напряженность ЭМП опишем аналогичным способом. В уравнении (1) заменим Y на X и ЭМП системы двух катушек вдоль оси X представим как арифметическую сумму двух функций Гаусса $F(X)_1$ и $F(X)_2$. Причем максимум (или математическое ожидание) функции $F(X)_2$ сместим относительно максимума функции $F(X)_1$ на расстояние d , равное межосевому расстоянию центров катушек индуктивности индуктора датчика. Таким образом, выражение для $F(X)$ примет следующий вид:

$$F(X) = e^{-\frac{(X)^2}{2(0,446D)^2}} + e^{-\frac{(X-d)^2}{2(0,446D)^2}}. \quad (3)$$

3. Экспериментальные данные изменения напряженности ЭМП над поверхностью катушек индуктора ДК в направлении оси Z в зависимости от расстояния до поверхности ДК приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные изменения модуля напряженности ЭМП над катушками в зависимости от расстояния до поверхности ДК

| Расстояние до поверхности чувствительного элемента ДК, мм | Значение модуля напряженности ЭМП над осью катушек индукторов ДК, у.е. | Значение модуля напряженности ЭМП на максимально возможном удалении реборды от головки рельса (80 мм), у.е. |
|---|--|---|
| 6 | 0,97 | 0,175 |
| 12 | 0,65 | 0,14 |
| 20 | 0,435 | 0,125 |
| 26 | 0,3 | 0,09 |

Обработка этих данных в программном пакете Wolfram Alpha показала, что лучшая аппроксимация этой зависимости достигается экспоненциальной кривой (функцией)

$$F(Z) = e^{-(Z \cdot 0,0587)}, \quad (4)$$

что соответствует данным исследований [2, 3], а также может быть аппроксимирована функцией натурального логарифма

$$F(Z) = 0,272 - 0,528 \ln(z).$$

4. Функциональная объемная нормированная зависимость напряженности ЭМП над поверхностью катушек как функция параметров $F(X, Y, Z, D, d)$ в условных единицах может быть представлена в общем виде как произведение (2), (3) и (4):

$$F(X, Y, Z) = \left[\left(1 \cdot e^{-\frac{(X)^2}{2\sigma^2}} \right) + \left(1 \cdot e^{-\frac{(X-d)^2}{2\sigma^2}} \right) \right] \times \left(1 \cdot e^{-\frac{(Y)^2}{2\sigma^2}} \right) \cdot (e^{-(Z-a)}). \quad (5)$$

Для средней экспериментально определенной величины $\sigma = 2,5$ см это выражение примет вид

$$F(X, Y, Z, D, d) = \left[\left(e^{-\frac{(X)^2}{2(0,446D)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-d)^2}{2(0,446D)^2}} \right) \right] \times \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2(0,446D)^2}} \right) \cdot (e^{-(Z-0,0587)}). \quad (6)$$

Для исходных данных $D = 5,6$ см, $d = 6,2$ см и $Z = 0$, т.е. непосредственно над поверхностью ДК, выражение для нормированной напряженности ЭМП примет вид

$$F(X, Y) = \left[\left(e^{-\frac{(X)^2}{2(2,5)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-6,2)^2}{2(2,5)^2}} \right) \right] \cdot \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2(2,5)^2}} \right). \quad (7)$$

График этой зависимости, построенный с использованием программного пакета Wolfram Alpha, представлен на рис. 4.

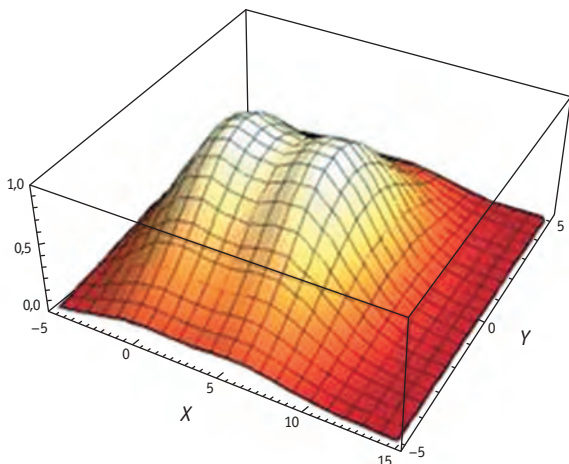


Рис. 4. График нормированной напряженности ЭМП непосредственно над поверхностью ДК

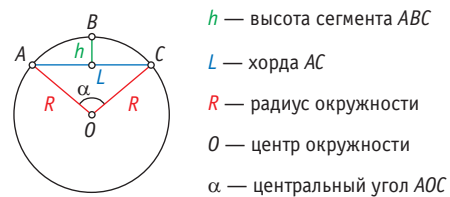
На рис. 4 по оси Z отложена нормированная величина напряженности ЭМП и не учтено ее изменение вдоль оси Z . Полная функциональная зависимость от всех параметров X, Y и Z может быть представлена только математическим выражением (6). В общем виде она графической интерпретации не имеет.

5. Для получения нормированной функции взаимодействия (реборды) колеса с ЭМП индуктора ДК необходимо в формуле (6) переменную Z выразить через $Z_{\text{нач}}$ и $Z_{\text{пер}}$. Здесь величина $Z_{\text{нач}}$ соответствует минимально возможному расстоянию от вершины реборды до поверхности ДК при проходе колеса над датчиком. Она определяется допустимым нормативными документами износом поверхности катания колеса и может принимать значения от 0,6 до 2 см. А величина $Z_{\text{пер}}$ (переменная составляющая величины Z) соответствует изменению расстояния от реборды до поверхности индуктора ДК при непосредственном проходе (продвижении) колеса над датчиком. Условно примем изменение величины X (продвижение колеса) относительно центра одной из катушек индуктора ДК в границах \approx от $-1/2R$ до $+R$, где R — радиус проходящего над ДК колеса.

На рис. 5 представлены диаграмма и формула, описывающая изменение переменной составляющей величины Z (высоты сегмента круга) при проходе колеса над датчиком.

Формула высоты сегмента круга

Сегмент — часть круга ABC , отсеченная хордой AC



$$h = Z_{\text{пер}} = R - \sqrt{R^2 - X^2}, \text{ где } X = L/2$$

Рис. 5. Диаграмма и формула изменения переменной составляющей величины Z при проходе колеса над ДК

Тогда для $Z = Z_{\text{нач}} + (R - \sqrt{R^2 - X^2})$ составляющая $F(Z) = e^{-(Z-a)}$ в формулах (5) и (6) примет вид

$$F(Z) = \exp^{-a \cdot Z} = e^{-a \cdot Z} = \left(e^{-0,0587 \cdot (Z_{\text{нач}} + R - \sqrt{R^2 - X^2})} \right), \quad (8)$$

а формула для взаимодействия реборды колеса и ЭМП ДК в общем виде преобразуется следующим образом:

$$F(X, Y, Z) = \left[\left(1 \cdot e^{-\frac{(X)^2}{2\sigma^2}} \right) + \left(1 \cdot e^{-\frac{(X-d)^2}{2\sigma^2}} \right) \right] \times \left(1 \cdot e^{-\frac{(Y)^2}{2\sigma^2}} \right) \cdot \left(e^{-a \cdot (Z_{\text{нач}} + R - \sqrt{R^2 - X^2})} \right). \quad (9)$$

И для частного случая при $D = 5,6$ см и $\sigma = 2,5$ см имеем

$$F(X, Y, Z) = \left[\left(e^{-\frac{(X)^2}{2(2,5)^2}} \right) + \left(e^{-\frac{(X-d)^2}{2(2,5)^2}} \right) \right] \times \left(e^{-\frac{(Y)^2}{2(2,5)^2}} \right) \cdot \left(e^{-0,0587(Z_{\text{нач}} + R - \sqrt{R^2 + X^2})} \right). \quad (10)$$

6. Для оценки адекватности упрощенной математической модели взаимодействия реборды колеса с ЭМП индуктора ДК были проведены исследования полученной функциональной зависимости как $F(X)$ при различных фиксированных значениях Z и Y . Таким способом имитировались износ поверхности катания (давались разные значения $Z_{\text{нач}}$) колеса и отклонение реборды (давались разные значения Y) колеса от боковой поверхности головки рельса, допустимые нормативными документацией. Представить эти данные подробно в рамках настоящей статьи не представляется возможным. Однако в обобщенном виде они приведены на рис. 6.

На рис. 6 по оси X показано направление и расстояние прохода колеса на расстоянии 6 мм над поверхностью ДК. По оси Y — отклонение реборды колеса от продольной оси симметрии датчика при этих проходах, по оси Z — отклонение напряжения на выходе устройства 4 (см. рис. 1). Ломающиеся кривые соответствуют экспериментальным данным, сглаженные кривые в условных единицах соответствуют данным, вычисленным по формуле (10), с их аппроксимацией функцией Гаусса.

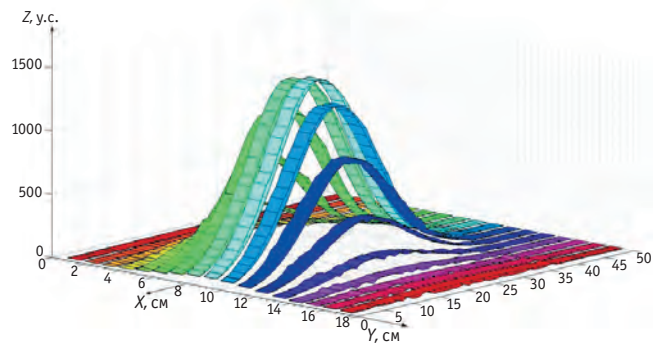


Рис. 6. Обобщенные экспериментальные данные и данные моделирования

Исследования показали, что предложенная упрощенная математическая модель взаимодействия реборды колеса с ЭМП индуктора ДК с достаточной степенью точности воспроизводит интересующие нас зависимости.

ВЫВОДЫ

Для проведения исследований и оптимизации параметров основных элементов ДК на этапе проектирования необходимо иметь адекватную модель взаимодействия колеса и индукторов ДК.

Предложенная упрощенная математическая модель с достаточной степенью точности воспроизводит такое взаимодействие, что позволяет выбрать необходимые параметры катушек индуктора ДК, обеспечивающие надежную работу ИДК при всех отклонениях реборды колеса и износах колеса и рельса, допускаемых нормативными документами.

Литература

1. Теоретические основы моделирования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/580776/> (дата обращения: 20.07.2017).
2. Рыжов С. Н. Вопросы применения индуктивных датчиков приближения. Обзор ФИЛКУССТ, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sensor.ru/pdf/technocomost/proxy.pdf> (дата обращения: 05.06.2017).
3. Inductive technology handbook [Электронный ресурс]. URL: http://www.kamansensors.com/pdf_files/Kaman_Applications_Handbook_WEB.pdf (дата обращения: 05.06.2017).
4. ЩигOLEV С. А., Сергеев Б. С. Анализ работы электромагнитного путевого датчика ДПЭП // Электротехника. 2000. № 7. С. 41–46. ISSN 0013-5860.
5. Ляной В. В. Индуктивные датчики регистрации прохода колеса железнодорожной подвижной единицы. Проблемы и перспективы использования // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 37–42. ISSN 1812-6782.
6. Немцов М. В. Справочник по расчету катушек индуктивности / 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1989. 192 с.
7. Ляной В. В. Обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта на основе совершенствования индуктивных датчиков регистрации колеса // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 93–98. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-93-98. ISSN 1812-6782.

References

1. Teoreticheskie osnovy modelirovaniya [Theoretical bases of modeling]. [Electronic resource]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/580776/> (access date: 20.07.2017).
2. Ryzhov S. N. Voprosy primeneniya induktivnykh datchikov priblizheniya. Obzor FILKUSST, 2016 [Specifications to the application of inductive proximity sensors. Review of FILKUSST, 2016]. [Electronic resource]. URL: <http://www.sensor.ru/pdf/technocomost/proxy.pdf> (access date: 05.06.2017).
3. Inductive technology handbook [Electronic resource]. URL: http://www.kamansensors.com/pdf_files/Kaman_Applications_Handbook_WEB.pdf (access date: 05.06.2017).
4. Shchigolev S. A., Sergeev B. S. Analiz raboty elektromagnitnogo putevogo datchika DPEP [Analysis of the work of the electromagnetic track sensor DPEP] // Elektrotehnika. 2000. № 7. С. 41–46. ISSN 0013-5860.
5. Lyanoy V. V. Induktivnye datchiki registratsii prokhoda kolesa zhelezнодорожнoй podvizhnoy edinitsy. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya [Inductive wheel sensor. Challenges and vistas of use] // Elektronika i elektrooborudovanie transporta. 2017. № 1. С. 37–42. ISSN 1812-6782.
6. Nemtsov M. V. Spravochnik po raschetu katushek induktivnosti [Guide to the calculation of inductance coils] / 2-e izd., pererab. i dop. M. : Energoatomizdat, 1989. 192 s.
7. Lyanoy V. V. Obespechenie bezopasnosti dvizheniya zhelezнодорожнoй transporta na osnove sovershenstvovaniya induktivnykh datchikov registratsii kolesa [Provision of rail traffic safety through improvement of inductive sensors of wheel registration] // Transport Urala. № 2 (49). С. 93–98. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-93-98. ISSN 1812-6782.

УДК 621.316.933.9

Александр Михайлович Костроминов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,
Александр Александрович Костроминов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,
Олег Николаевич Тюлядин, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИЙ КОМПОНЕНТОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ УСТРОЙСТВ

Alexander Mikhaylovich Kostrominov, DSc in Engineering, Professor, Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,
Alexander Alexandrovich Kostrominov, PhD in Engineering, Associate Professor, Higher Mathematics Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,
Oleg Nikolayevich Tyulyandin, postgraduate student, Electrical Communications Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Effect of component dispersions on the electromagnetic compatibility of devices

Аннотация

С целью поддержки принятия обоснованных проектно-конструкторских решений при разработке новых систем на полупроводниковых элементах для эксплуатации в сложной электромагнитной обстановке предлагается рассматривать параметрическую совместимость средств защиты, защищаемых объектов и электромагнитной обстановки с учетом дисперсионных свойств их параметров. Для этого разработана вероятностная модель, позволяющая принять решение по выбору параметров защитного средства исходя из требуемой надежности.

На примере бесконтактного коммутатора тока, построенного на электронных элементах и серийно выпускаемого российскими заводами, показано, что с помощью метода Монте-Карло существует возможность получения закона распределения одного из значимых параметров этого устройства — порогового напряжения срабатывания. Приведен численный пример статистического моделирования сборки порогового устройства, составленного из последовательно соединенных элементов с пороговыми свойствами — стабилитронов. На этом примере показано, что система из стабилитронов с равномерным законом распределения случайной величины порогового напряжения имеет суммарное пороговое напряжение, распределенное по нормальному закону. Данный результат является иллюстрацией практического приложения центральной предельной теоремы теории вероятностей.

Применительно к бесконтактному коммутатору тока для защиты его компонентов от мощных импульсных помех, поступающих по цепям питания и из рельсовой линии, приведены расчеты параметров полупроводников с использованием вероятностной модели.

Представленный в статье метод может быть использован для широкого круга практических задач параметрической совместимости, в которых требуется найти оптимальное решение по критерию надежности.

Ключевые слова: мощная импульсная электромагнитная помеха, бесконтактный коммутатор тока, пороговое устройство, вероятностная модель, плотность распределения случайной величины, метод Монте-Карло.

Summary

In order to support the adoption of well-founded design solutions in the development of new systems on semiconductor elements for operation in a complex electromagnetic environment it is proposed to consider the parametric compatibility of means of protection, protected objects and electromagnetic environment, taking into account the dispersion properties of their parameters. To this end, a probabilistic model has been developed that makes it possible to take a decision on the choice of the parameters of the protective device based on the required reliability.

With the example of a contactless current switch built on electronic components and mass-produced by Russian plants, it is shown that using the Monte Carlo method it is possible to obtain the distribution law of one of the significant parameters of this device — the threshold voltage of operation. A numerical example of a statistical simulation of an assembly of a threshold device composed of series-connected elements with threshold properties — zener diodes — is given. This example shows that a system of zener diodes with a uniform distribution law of a random value of the threshold voltage has a total threshold voltage distributed according to the normal law. This result is an illustration of the practical application of the central limit theorem of probability theory.

As applied to the contactless current switch to protect its components from the powerful impulse noise coming through the supply circuits and from the rail line, calculations of the parameters of semiconductors using a probabilistic model are presented.

The method presented in the article can be used for a wide range of practical problems of parametric compatibility, in which it is required to find the optimal solution by the reliability criterion.

Keywords: powerful pulsed electromagnetic interference, contactless current switch, threshold device, probabilistic model, distribution density of a random variable, Monte Carlo method.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-29-34

ВВЕДЕНИЕ

При внедрении электронных систем приходится решать проблему, связанную с влиянием на них различного вида электромагнитных помех. Для устройств железнодорожной автоматики особую актуальность приобретает защита полупроводниковых приборов в системах бесконтактной коммутации тока, формирующих числовой код в рельсовые цепи, от мощных импульсных помех (МИП), создаваемых как молниевыми процессами, так и скачками тяговых токов.

Очевидно, что параметры средств защиты (СЗ) и параметры защищаемых объектов с точки зрения чувствительности к МИП обладают дисперсионными свойствами, причем разбросы параметров могут быть весьма значительными. Соответственно отсутствие вероятностного расчета сопрягаемых параметров при выборе полупроводниковых элементов приводит либо к необоснованной избыточности и удорожанию изделия, либо (чаще всего) к повышенным рискам снижения его надежности. Однако в нормативных документах, регламентирующих условия применения любых защитных средств, отсутствует вероятностная составляющая принятия решения по параметрам СЗ. Поэтому разработка метода обеспечения параметрической совместимости СЗ и защищаемых объектов, учитывающего их дисперсионные свойства, является весьма актуальной задачей. Рассмотрим решение данной задачи на примере бесконтактного коммутатора тока, имеющего встроенную защиту от МИП.

1. БЕСКОНТАКТНЫЙ КОММУТАТОР ТОКА

В 70-х гг. прошлого столетия был разработан бесконтактный коммутатор тока, получивший заводское обозначение БКТ [1–12]. Впоследствии на базе БКТ было создано ключевое защитное устройство (КЗУ) для ограничения мощных импульсных помех [13–18] с целью защиты устройств СЦБ и связи от грозовых и коммутационных перенапряжений со стороны питающей сети переменного тока. Силовыми элементами БКТ (рис. 1) являются диоды $VD1$, $VD2$ и тиристоры $VS1$, $VS2$, которые выбирают так, чтобы при максимально возможных токах МИП не происходило тепловой перегрузки в структуре полупроводников (рабочие токи кодирования рельсовых цепей в меньшей степени нагружают эти силовые приборы).

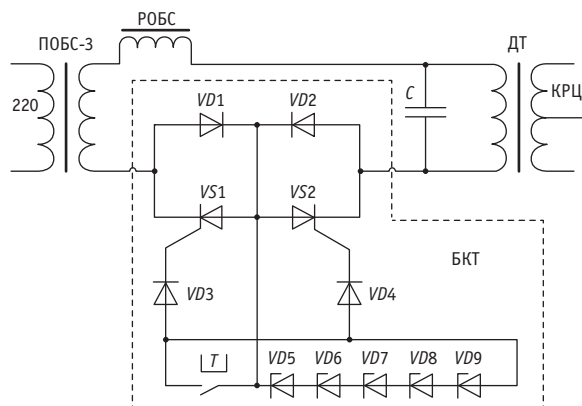


Рис. 1. Схема питающего конца кодовой рельсовой цепи с БКТ

В схеме БКТ диоды $VD3$, $VD4$ являются вспомогательными и служат для развязки цепей управления тиристорами.

Кодированием рельсовой цепи управляет контакт трансмиттерного реле Т. При замыкании этого контакта в зависимости от мгновенной полярности напряжения, поступающего с вторичной обмотки трансформатора ПОБС-3, протекает ток через управляющий электрод тиристора $VS1$ или $VS2$. При достижении тока, достаточного для включения одного из этих тириستоров, тиристор включается и шунтирует цепь управления, благодаря чему токовая нагрузка на контакт Т получается пренебрежимо малой и не влияет на предельный ресурс числа срабатываний трансмиттерного реле.

В режиме замкнутого состояния контакта Т воздействие импульсных перенапряжений со стороны питания или со стороны рельсовой цепи не создает рисков для диодов $VD1$ – $VD4$, поскольку тот или иной включенный тиристор исключает на этих диодах опасные обратные напряжения.

При разомкнутом контакте трансмиттерного реле Т силовые и вспомогательные диоды $VD1$ – $VD4$ испытывают опасное воздействие импульсных перенапряжений, поступающих как со стороны питания, так и со стороны рельсовой цепи. Поэтому для их защиты в БКТ предусмотрено устройство ограничения перенапряжений в виде цепи последовательно соединенных стабилитронов $VD5$ – $VD9$, работающих совместно с тиристорами $VS1$ и $VS2$.

Напряжение порога срабатывания $U_{пор.с}$ цепи стабилитронов $VD5$ – $VD9$ на рис. 1 (в различных модификациях БКТ число стабилитронов может быть разным) выбирается из условия

$$U_{пит} < U_{пор.с} < U_{н.доп}$$

где $U_{пит}$ — случайная величина напряжения питания;

$U_{н.доп}$ — случайная величина допустимого напряжения диодов $VD1$ – $VD4$.

Среди множества пороговых элементов стабилитроны являются наиболее подходящими для устройства ограничения перенапряжений, поскольку, во-первых, имеют температурный дрейф порога, благоприятный для температурного дрейфа характеристик чувствительности тириستоров по управлению (с ростом температуры возрастание чувствительности тиристоров компенсируется некоторым повышением порога срабатывания стабилитронов), во-вторых, обладают малым дифференциальным сопротивлением в надпороговой области вольт-амперной характеристики, благодаря чему уровень ограничения практически не зависит от тока МИП, проходящего через силовые элементы БКТ.

Рассмотрим принцип действия защиты диодов $VD1$ – $VD4$ с помощью стабилитронов от опасных обратных перенапряжений при разомкнутом состоянии контакта трансмиттерного реле Т (см. рис. 1). Отметим, что в этом случае тиристоры $VS1$ и $VS2$ закрыты.

При появлении мощной импульсной помехи (например, вследствие действия молниевых разрядов), в результате того что амплитуда ее напряжения (перенапряжения) превышает уровень напряжения $U_{пор.с}$ порога стабилитронов $VD5$ – $VD9$, в цепи управления одного из тиристоров (для которого

положительная полярность помехи приложена к аноду) протекает ток управления. По достижении этим током уровня тока включения тиристора последний открывается и шунтирует цепь стабилизаторов, благодаря чему токовая нагрузка на стабилизаторы от воздействия МИП длится только на время включения тиристора. Остаточное напряжение от мощной импульсной помехи определяется падением напряжения на открытых диоде и тиристоре и составляет 2–3 В. Таким образом, перенапряжение любого происхождения, контролируемое системой в виде цепи стабилизаторов, ограничивается с помощью последней, при этом диоды VD1–VD4 оказываются защищенными от избыточного напряжения.

По окончании действия мощной импульсной помехи и, возможно, полуволны совпадающей полярности переменного тока стационарного источника питания (не более 10 мс) тиристоры закрываются, а БКТ переходит вновь в закрытое состояние.

2. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В БКТ датчиком перенапряжений является пороговое устройство (система) в виде последовательно соединенных стабилизаторов (элементов), типичная характеристика которых показана на рис. 2. Уровень порогового напряжения этого устройства образуется как результат арифметического суммирования напряжений стабилизации каждого из стабилизаторов при одинаковом для всех стабилизаторов токе (например, при значении тока 50 мА для стабилизаторов типа КС650А [19]). Конструктор, пользуясь справочными данными [19], выбирает n последовательно соединенных стабилизаторов для получения расчетного уровня напряжения порогового устройства.

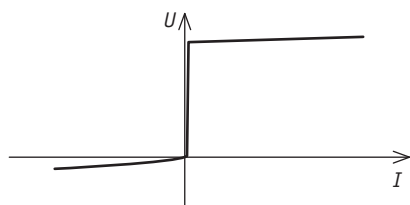


Рис. 2. Типичная вольт-амперная характеристика стабилизатора

Согласно [19], напряжение стабилизации (порога) $U_{\text{пор}}$ у выбранных типов стабилизаторов имеет разброс $\pm 15\%$. Кроме того, дополнительными исследованиями установлено, что случайная величина (СВ) напряжения стабилизации (порога) $U_{\text{пор}}$ имеет равномерный закон распределения [7].

Конструктору известно, что при производстве приборов защиты в заводских условиях сборка порогового устройства осуществляется следующим образом: перед сборщиком находятся n коробок (упаковок) со стабилизаторами, если стабилизаторы различных типов, и одна коробка, если стабилизаторы одного типа. В обоих случаях сборщик наугад берет стабилизаторы из коробки (коробки) и монтирует из них пороговое устройство.

Очевидно, что уровень напряжения порогового устройства из n стабилизаторов $U_{\text{пор},s}$ (системы s) при такой организации сборки представляет собой случайную величину. Задача конструктора — определить приемлемость собираемого с помощью

рассмотренной технологии порогового устройства по критериям вероятности P защиты диодов VD1–VD4 в БКТ и вероятность $Q_{\text{л}}$ ложного срабатывания БКТ (случай, когда максимальное допустимое напряжение питания превышает уровень напряжения порогового устройства БКТ). Графическое отображение задачи для нормальных распределений случайных величин $U_{\text{пит}}, U_{\text{пор},s}, U_{\text{н,доп}}$ показано на рис. 3. При заданных вероятностных нормативах P и $Q_{\text{л}}$ и известных распределениях $f(U_{\text{пит}})$ и $f(U_{\text{н,доп}})$ решение задачи сводится к определению вида распределения $f(U_{\text{пор},s})$ и его параметров и использованию формул:

$$Q_{\text{л}} = 1 - \Phi^*(x_1), x_1 = \left| \frac{m_{U_{\text{пор},s}} - m_{U_{\text{пит}}}}{\sqrt{\sigma_{U_{\text{пор},s}}^2 + \sigma_{U_{\text{пит}}}^2}} \right|; \quad (1)$$

$$P = \Phi^*(x_2), x_2 = \left| \frac{m_{U_{\text{пит}}} - m_{U_{\text{пор},s}}}{\sqrt{\sigma_{U_{\text{пор},s}}^2 + \sigma_{U_{\text{н,доп}}}^2}} \right|, \quad (2)$$

где $\Phi^*(x_1)$, $\Phi^*(x_2)$ — табулированные значения нормированной нормальной функции распределения [19];

$m_{U_{\text{пит}}}$, $m_{U_{\text{пор},s}}$, $m_{U_{\text{н,доп}}}$ — математические ожидания случайных величин амплитудных значений питающего напряжения, напряжения порога срабатывания стабилизаторной защиты БКТ и допустимого напряжения диодов VD1–VD4 соответственно;

$\sigma_{U_{\text{пит}}}$, $\sigma_{U_{\text{пор},s}}$, $\sigma_{U_{\text{н,доп}}}$ — среднеквадратичные отклонения случайных величин амплитудных значений питающего напряжения, напряжения порога срабатывания стабилизаторной защиты БКТ и допустимого напряжения диодов VD1–VD4 соответственно.

Следует заметить, что по формулам (1) и (2) можно находить как неизвестные параметры распределений СВ, так и вероятности P и $Q_{\text{л}}$ по известным параметрам распределений СВ.

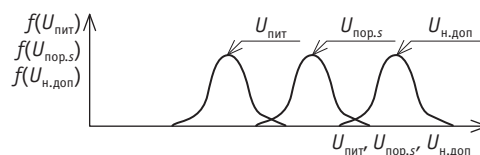


Рис. 3. Графическое отображение задачи

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ ЦЕПИ СТАБИЛИЗАТОРОВ

Для решения задачи, поставленной перед конструктором (см. раздел 2), необходимо иметь информацию о случайной величине $U_{\text{пор},s}$ системы, состоящей из последовательно соединенных стабилизаторов. Эффективным способом получения этой информации является статистическое моделирование методом Монте-Карло.

Суть метода заключается в получении случайных величин из плотностей распределения параметров элементов и построении из этих СВ большого числа систем (в рассмотренном выше примере — в виртуальном составлении большого числа цепей из последовательно соединенных стабилизаторов). Для этого надо воспроизвести в компьютерном виде сборку системы

из последовательно соединенных стабилитронов (порогового устройства) при тех условиях и ограничениях, которые приведены в разделе 2. Программа моделирования составляется таким образом, что при введенных статистических свойствах элементов (законах и параметрах распределения стабилитронов в рассматриваемом примере) компьютер случайным образом (подобно сборщику) берет каждый из стабилитронов (случайными у них являются пороговые напряжения $U_{пор}$) и фиксирует получившийся уровень напряжения порогового устройства $U_{пор,с}$. Эта операция многократно повторяется, и каждый раз уровень напряжения порогового устройства $U_{пор,с}$ фиксируется. В результате получается распределение случайной величины $U_{пор,с}$ (уровень напряжения порогового устройства).

4. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Для получения случайных величин, имеющих различные распределения, обычно используются нормированные СВ с равномерным распределением в интервале (0; 1). Существуют таблицы значений случайных величин с таким распределением, а также компьютерные программы для их генерирования. При этом алгоритм преобразования равномерно распределенной нормированной случайной величины в СВ, распределенную по любому закону, следующий (рис. 4):

вводится закон изменения СВ параметра элемента. Например, для стабилитронов — равномерная плотность изменения СВ $f(U_{пор})$ (рис. 4а);

введенный (в дифференциальной форме) закон изменения СВ $f(U_{пор})$ преобразуется в интегральную форму $F(U_{пор})$ (рис. 4б). С помощью генератора случайных чисел генерируется СВ, равномерно распределенная в интервале (0; 1) (точка 1 на рис. 4б);

значение этой СВ приравнивается значению интегральной функции распределения случайной величины, характеризующей элемент (точка 2 на рис. 4б);

находится численное значение случайной величины, характеризующей элемент (точка 3 на рис. 4б).

В приведенном алгоритме используется свойство равномерного распределения интегральной функции в интервале (0; 1) любой непрерывной случайной величины.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ $U_{пор,с}$ И РАСЧЕТЫ

Не обсуждая конкретные условия выбора типа и числа стабилитронов порогового устройства (это тема отдельной статьи), для иллюстрации рассматриваемого метода оценки влияния дисперсий стабилитронов (компонентов БКТ) на электромагнитную совместимость силовой части системы кодирования рельсовой цепи примем в качестве примера следующие исходные данные: $U_{пит} = 220 \text{ В} \pm 10\%$, пороговое устройство состоит из трех стабилитронов типа КС650А с $U_{пор} = 150 \text{ В} \pm 15\%$.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения порогового напряжения $U_{пор,с}$ системы из трех стабилитронов типа КС650А с $U_{пор} = 150 \text{ В} \pm 15\%$, полученная методом, рассмотренным в разделах 3 и 4. Вид гистограммы указывает на нормальный закон изменения случайной величины $U_{пор,с}$ параметры распределения $m_{U_{пор,с}} = 450,5 \text{ В}$, $\sigma_{U_{пор,с}} = 21,84 \text{ В}$.

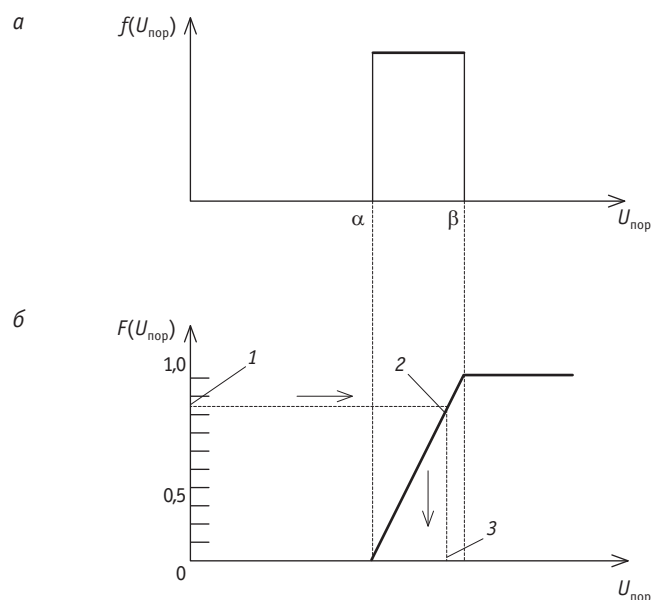


Рис. 4. Генерирование равномерно распределенных случайных чисел на интервале (α, β) методом преобразования равномерно распределенной на интервале (0;1) случайной величины:
 $f(U_{пор})$ — плотность распределения случайной величины $U_{пор}$;
 $F(U_{пор})$ — интегральная функция распределения случайной величины $U_{пор}$

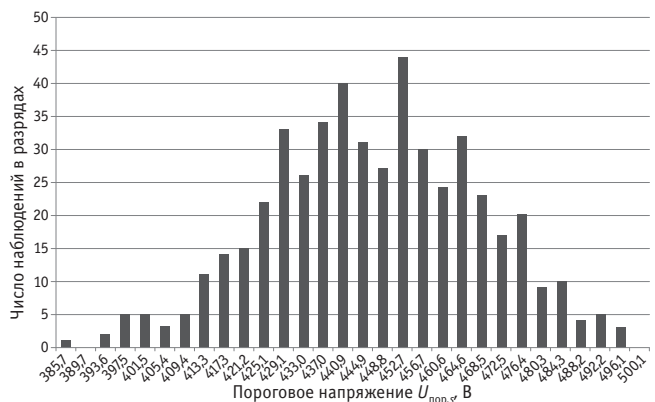


Рис. 5. Гистограмма нормального распределения $U_{пор,с}$ системы из трех стабилитронов типа КС650А

Заметим, что полученное нормальное распределение наглядно иллюстрирует проявление центральной предельной теоремы теории вероятностей.

Рассмотрим приложение полученного результата для решения исходной задачи.

Если БКТ со стабилитронным пороговым устройством включен в цепь питания с напряжением $220 \text{ В} \pm 10\%$ и верхним амплитудным значением $242\sqrt{2} = 341,22 \text{ В}$, то, принимая эту величину как детерминированную и подставляя ее и параметры распределения $m_{U_{пор,с}} = 450,5 \text{ В}$, $\sigma_{U_{пор,с}} = 21,84 \text{ В}$ в формулу (1), получим $x_1 = 5,0$. Далее по таблице в [20] находим $\Phi^*(5,0) = 0,9999997$ и получаем искомую вероятность $Q_{л} = 3 \cdot 10^{-7}$.

При отсутствии сведений о законе и параметрах распределения величины $U_{н.доп}$ можно по формуле (2) вычислить нижнее значение величины $U_{н.доп}$ (полагая ее тоже детерминированной), задаваясь вероятностью P , например, 0,99999. По таблице в [20] для $\Phi^*(x_2) = 0,99999$ находим $x_2 = 4,28$. Подставляя в (2) численные значения $m_{U_{пор.з}} = 450,5$ В и $\sigma_{U_{пор.з}} = 21,84$ В, получим $U_{н.доп} = 465,07$ В. Следовательно, если проектируется БКТ с тремя стабилитронами КС630А, то допустимое напряжение используемых в нем диодов $VD1-V D4$ должно быть не ниже 543,98 В.

Литература

1. А. с. 422103 СССР. Коммутатор резонансной цепи переменного тока / В. Ю. Ефимов, А. М. Костроминов, М. П. Лисовский и др. // БИ. 1974. № 12.
2. Полупроводниковое транзиттерное реле / Б. Н. Филиппов, В. Ю. Ефимов, А. М. Костроминов, М. П. Лисовский // Автоматика, телемеханика и связь. 1974. № 4. С. 4–5. ISSN 0005-2329.
3. А. с. 680938 СССР. Устройство коммутации кодовых рельсовых цепей / Н. Г. Капитоненко, А. М. Костроминов, А. А. Красногооров, В. Г. Попов // БИ. 1979. № 31.
4. А. с. 1066869 СССР. Устройство коммутации кодовых рельсовых цепей / В. С. Аркатов, А. С. Переборов, И. Л. Дубрава и др. // БИ. 1984. № 2.
5. Переборов А. С., Костроминов А. М. Бесконтактный коммутатор тока // Автоматика, телемеханика и связь. 1986. № 4. С. 4–6. ISSN 0005-2329.
6. Елкин Б. Н., Костроминов А. М. Использование бесконтактного коммутатора тока для кодирования станционных рельсовых цепей // Автоматика, телемеханика и связь. 1990. № 6. С. 24–25. ISSN 0005-2329.
7. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех. М. : Транспорт, 1997. 192 с.
8. Сороков В. И., Розенберг Е. Н. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. в 2 кн. Кн. 2. М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. 1008 с.
9. Коммутатор переменного тока / А. М. Костроминов, А. А. Красногооров, В. Н. Сусоев и др. : свидетельство на полез. модель 25306 Рос. Федерация. № 2002111786/20 ; заявл. 06.05.02 ; опубл. 27.09.02, Бюл. № 27.
10. Коммутатор переменного тока / А-й А. Костроминов, А. М. Костроминов, С. В. Ларчин и др. : пат. на полез. модель 67535 Рос. Федерация. № 2007123419/22 ; заявл. 21.06.07 ; опубл. 27.10.07, Бюл. № 30.
11. Коммутатор переменного тока / А. И. Каменев, А-й А. Костроминов, А. М. Костроминов, Ю. К. Соседов : пат. на полез. модель 99676 Рос. Федерация. № 2010128836/08 ; заявл. 12.07.10 ; опубл. 20.11.10, Бюл. № 32.
12. Устройство коммутации кодовых рельсовых цепей / А. М. Костроминов, М. М. Лукичев : пат. на полез. модель 109724 Рос. Федерация. № 2011100855/11 ; заявл. 12.01.11 ; опубл. 27.10.11, Бюл. № 30.
13. А. с. 1224898 СССР. Устройство для защиты электронной нагрузки от перенапряжений / В. С. Аркатов, А. М. Костроминов, А. А. Иванов, А. Д. Манаков // БИ. 1986. № 14.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье метод оценки влияния дисперсий стабилитронов (компонентов БКТ) на электромагнитную совместимость силовой части системы кодирования рельсовой цепи является эффективным инструментом для принятия решений при проектировании как средств, так и объектов защиты с заданными характеристиками надежности. Этот метод может применяться для широкого круга практических задач параметрической совместимости, в которых требуется найти оптимальное решение по критерию надежности.

References

1. A. s. 422103 SSSR. Kommutator rezonansnoy tsepi peremennogo toka [Resonance circuit switch of alternating current] / V. Yu. Efimov, A. M. Kostrominov, M. P. Lisovskiy i dr. // BI. 1974. № 12.
2. Poluprovodnikovoe transmitternoe rele [Semiconducting transmitted relay] / B. N. Filippov, V. Yu. Efimov, A. M. Kostrominov, M. P. Lisovskiy // Avtomatika, telemekhanika i svyaz'. 1974. № 4. S. 4–5. ISSN 0005-2329.
3. A. s. 680938 SSSR. Ustroystvo kommutatsii kodovykh rel'sovykh tsepey [Commutation device for coded rail circuits] / N. G. Kapitonenko, A. M. Kostrominov, A. A. Krasnogorov, V. G. Popov // BI. 1979. № 31.
4. A. s. 1066869 SSSR. Ustroystvo kommutatsii kodovykh rel'sovykh tsepey [Commutation device for coded rail circuits] / V. S. Arkatov, A. S. Pereborov, I. L. Dubrava i dr. // BI. 1984. № 2.
5. Pereborov A. S., Kostrominov A. M. Beskontaktnyy kommutator toka [Contactless current switch] // Avtomatika, telemekhanika i svyaz'. 1986. № 4. S. 4–6. ISSN 0005-2329.
6. Elkin B. N., Kostrominov A. M. Ispol'zovanie beskontaktnogo kommutatora toka dlya kodirovaniya stantsionnykh rel'sovykh tsepey [Using a contactless current switch to encode station rail circuits] // Avtomatika, telemekhanika i svyaz'. 1990. № 6. S. 24–25. ISSN 0005-2329.
7. Kostrominov A. M. Zashchita ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot pomekh [Protection of railway automation and telemechanics devices from interference]. M. : Transport, 1997. 192 s.
8. Sorokov V. I., Rozenberg E. N. Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Railway automation and telemechanics equipment] : sprav. v 2 kn. Kn. 2. M. : NPF «PLANETA», 2000. 1008 s.
9. Kommutator peremennogo toka [AC switch] / A. M. Kostrominov, A. A. Krasnogorov, V. N. Susoev i dr. : svidetel'stvo na polez. model' 25306 Ros. Federatsiya. № 2002111786/20 ; zayavl. 06.05.02 ; opubl. 27.09.02, Byul. № 27.
10. Kommutator peremennogo toka [AC switch] / A-y A. Kostrominov, A. M. Kostrominov, S. V. Larchin i dr. : pat. na polez. model' 67535 Ros. Federatsiya. № 2007123419/22 ; zayavl. 21.06.07 ; opubl. 27.10.07, Byul. № 30.
11. Kommutator peremennogo toka [AC switch] / A. I. Kamenev, A-y A. Kostrominov, A. M. Kostrominov, Yu. K. Sosodov : pat. na polez. model' 99676 Ros. Federatsiya. № 2010128836/08 ; zayavl. 12.07.10 ; opubl. 20.11.10, Byul. № 32.
12. Ustroystvo kommutatsii kodovykh rel'sovykh tsepey [Commutation device for coded rail circuits] / A. M. Kostrominov, M. M. Lukichev : pat. na polez. model' 109724 Ros. Federatsiya. № 2011100855/11 ; zayavl. 12.01.11 ; opubl. 27.10.11, Byul. № 30.
13. A. s. 1224898 SSSR. Ustroystvo dlya zashchity elektronnoy nagruzki ot perenapryazheniy [Device for protecting electronic load from over-voltages] / V. S. Arkatov, A. M. Kostrominov, A. A. Ivanov, A. D. Manakov // BI. 1986. № 14.
14. Klyuchevoye zashchitnoye ustroystvo [Key protective device] / A. M. Kostrominov, A. A. Ivanov, A. D. Manakov i dr. // Avtomatika, telemekhanika i svyaz'. 1987. № 10. S. 15–17. ISSN 0005-2329.

14. Ключевое защитное устройство / А. М. Костроминов, А. А. Иванов, А. Д. Манаков и др. // Автоматика, телемеханика и связь. 1987. № 10. С. 15–17. ISSN 0005-2329.
15. А. с. 1374332 СССР. Устройство для защиты электронной нагрузки от перенапряжений / А. М. Костроминов, А. Д. Манаков // БИ. 1988. № 6.
16. А. с. 1647752 СССР. Устройство для защиты от аварий, реагирующее на избыточное напряжение малой длительности / А. В. Бушуев, А. М. Костроминов, Б. Н. Филиппов // БИ. 1991. № 17.
17. Ключевые метод и средство защиты от мощных импульсных помех / А. М. Костроминов, В. И. Лаппо, Э. Н. Фоминич, М. А. Шварц // Сб. науч. докл. междунар. симп. ЭМС-93. СПб., 1993. Ч. 3. С. 650–652.
18. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. проф. Вл. В. Сапожникова. М. : Маршрут, 2005. 453 с.
19. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Под общ. ред. Н. Н. Горюнова ; изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Энергия, 1972. 568 с.
20. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М. : Наука, 1965. 512 с.
15. А. с. 1374332 SSSR. Ustroystvo dlya zashchity elektronnoy nagruzki ot perenapryazheniy [Device for protecting electronic load from over-voltages] / A. M. Kostrominov, A. D. Manakov // BI. 1988. № 6.
16. А. с. 1647752 SSSR. Ustroystvo dlya zashchity ot avari, reagiruyushchee na izbytochnoe napryazhenie maloy dlitel'nosti [Accident protection device responding to short-time overvoltage] / A. V. Bushuev, A. M. Kostrominov, B. N. Filippov // BI. 1991. № 17.
17. Klyuchevye metod i sredstvo zashchity ot moshchnykh impul'snykh pomekh [The key method and means of protection from high-power impulse noise] / A. M. Kostrominov, V. I. Lappo, E. N. Fominich, M. A. Shvarts // Sb. nauch. dokl. mezhdunar. simp. EMS-93. SPb., 1993. Ch. 3. S. 650–652.
18. Elektropitanie ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Power supply of railway automation, telemechanics and communication devices] : ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. / Pod red. prof. Vl. V. Sapozhnikova. M. : Marshrut, 2005. 453 s.
19. Spravochnik po poluprovodnikovym diodam, tranzistoram i integral'nym skhemam [A guide to semiconductor diodes, transistors and integrated circuits] / Pod obshch. red. N. N. Goryunova ; izd. 3-e, pererab. i dop. M. : Energiya, 1972. 568 s.
20. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V. Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy [Course of the theory of probability and mathematical statistics for technical applications]. M. : Nauka, 1965. 512 s.

УДК 656.25.027.3

Юрий Валерьевич Могильников, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Константин Вячеславович Гундырев, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ришат Зинфирович Галинуров, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ В КОНТЕКСТЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СООБЩЕНИЯ

Yuriy Valeryevich Mogilnikov, Assistant Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Konstantin Vyacheslavovich Gundyrev, Senior Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Rishat Zinfirovich Galinurov, postgraduate student, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Control systems of trains traffic in the context of high-speed means of communication

Аннотация

Статья посвящена оценке систем интервального регулирования движения поездов в условиях развития высокоскоростных магистралей (ВСМ). На основе анализа выявлены преимущества и недостатки эксплуатируемых систем железнодорожной автоматики с точки зрения организации высокоскоростного движения. Предложены системы интервального регулирования движения поездов, удовлетворяющие требованиям эксплуатации ВСМ по существующим линиям.

Ключевые слова: высокоскоростное движение, высокоскоростные магистрали, системы железнодорожной автоматики, электрическая централизация, автоблокировка.

Summary

The article is about the estimation of the systems of interval regulation of train traffic in the conditions of high-speed lines development (HSL). Based on the analysis, the advantages and disadvantages of the operated railway automation systems are revealed in terms of the organization of high-speed traffic. Systems for interval regulation of train traffic are proposed, which satisfy the requirements for the operation of the HSL on existing lines.

Keywords: high-speed traffic, high-speed lines, railway automation systems, electric centralization, auto-locking.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-35-40

Экономика и благосостояние Российской Федерации тесно связаны с развитием сети железных дорог, одним из ключевых направлений которого является расширение полигона скоростных и высокоскоростных перевозок между крупнейшими агломерациями [1].

С уверенностью можно сказать, что реализация проектов по строительству высокоскоростных магистралей (ВСМ) показывает не только экономическую, но и техническую и технологическую зрелость государства. Но есть и ряд проблем, к которым может привести развитие ВСМ. Поскольку на большинстве линий для организации высокоскоростного, пригородного и грузового сообщения используются одни и те же пути, то неизбежны задержки поездов и, как следствие, снижение пропускной способности. Кроме того, существует риск создания в России высокоскоростных магистралей, которые на 2–3 поколения будут отставать от ВСМ Европы, Японии и Китая [2].

На всем протяжении железнодорожной сети РФ используется смешанный тип движения: грузовые и пассажирские поезда, имеющие различные технические характеристики, вынуждены осуществлять перевозки по одним и тем же железнодорожным линиям. Однако, как показывает мировой опыт, рациональным решением, позволяющим снизить издержки по содержанию и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры и обеспечить прозрачность механизмов ценообразования на ее услуги, может быть разделение грузовой и пассажирской составляющих по принципу «масса — скорость» [3].

Одна из эффективных мер такого разделения — строительство для высокоскоростного движения специализированных линий [4].

Развитие высокоскоростного движения в России связано с реализацией проекта магистрали Москва — Казань — Екатеринбург, в рамках которого поставлена задача организовать движение со скоростью 400 км/ч. При осуществлении этого проекта на первый план выходят вопросы создания системы управления движением поездов (СУДП), в том числе определение общесистемных требований к СУДП, включая выбор структуры и состава подсистем. Основной технологической особенностью магистрали Москва — Казань — Екатеринбург является необходимость обеспечить управление смешанным движением высокоскоростных, скоростных пассажирских, ускоренных грузовых (контейнерных или контейнерных) и хозяйственных поездов, поэтому функции СУДП должны быть увязаны с соответствующими категориями передвижений. Кроме того, развитие ВСМ должно быть сопряжено с реализацией программы по организации тяжеловесного движения, имеющего свою специфику, обусловленную удлинением приемо-отправочных путей, усилением обратной тяговой сети, работой над помехоустойчивостью кодов [5]. В соответствии с этим дифференцируются следующие виды передвижений: высокоскоростные, поездные и маневровые. Каждый из главных путей на перегонах и станциях должен быть равнозначным с точки зрения направления движения поездов и обеспечения скоростного режима [6].

Поэтому сегодня к числу приоритетных направлений развития железнодорожной автоматики, телемеханики и связи относятся создание российской СУДП и обеспечение безопасности движения поездов на выделенных железнодорожных линиях.

Система управления на ВСМ рассматривается как единый комплекс технологических процессов всех смежных хозяйств (рис. 1), включающий модернизацию подвижного состава,

строительство путей, мостов, тоннелей, внедрение систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП), проведение мониторинга, диагностики, ремонтных работ и др.

В общем случае СИРДП может быть реализована тремя способами, которые принципиально отличаются по допустимому интервалу между подвижными единицами, это:

- децентрализованное регулирование движения поездов;
- централизованное регулирование;
- координатное регулирование.

При первом способе — децентрализованном — регулирование движения поездов осуществляется по фиксированным блок-участкам. В данном случае используются рельсовые цепи с их традиционными функциями датчика свободности, занятости и целостности участка пути, а также функциями канала передачи информации на локомотив — на поезд передаются сигналы, вырабатываемые аппаратурой децентрализованного контура управления. На российских железных дорогах широко применяется децентрализованная система числовой кодовой автоблокировки (рис. 2).

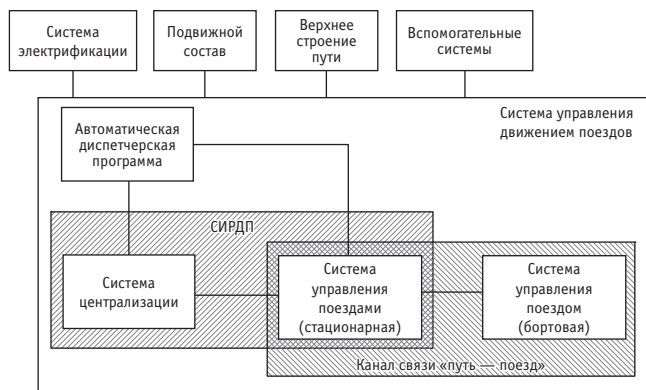


Рис. 1. Структура систем управления движением поездов

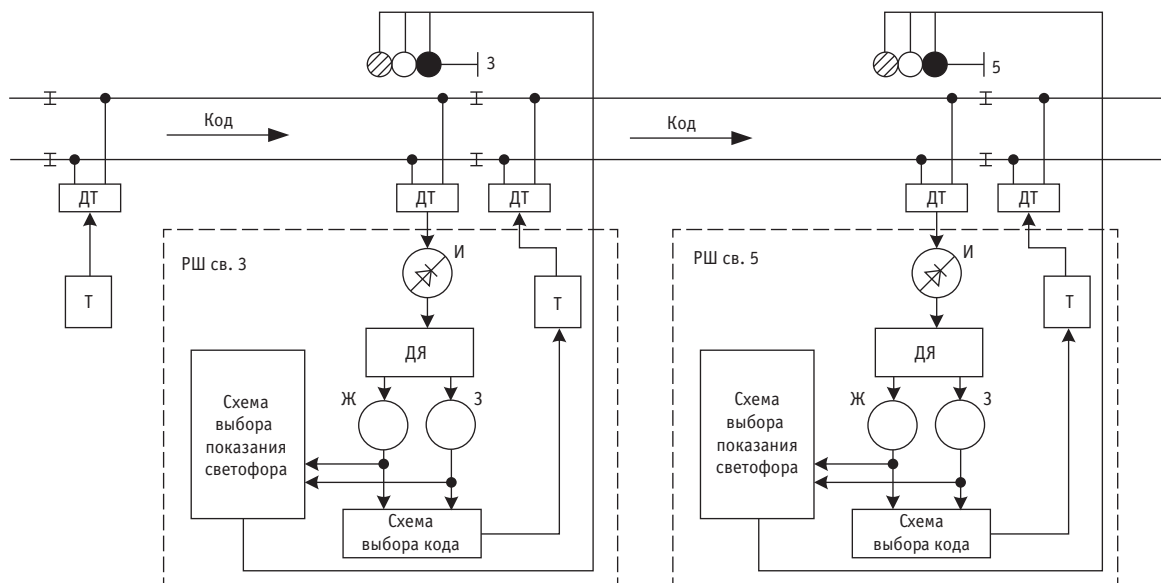


Рис. 2. Структурная схема числовой кодовой автоблокировки

Среди главных причин недостаточной пропускной способности такой автоблокировки следует отметить полное отсутствие гибкости в управлении движением поездов, низкую точность определения местоположения поездов на перегоне, обусловленную применением рельсовых цепей длиной до 2600 м.

Использование напольной аппаратуры автоблокировки требует ее обеспечения непрерывным электропитанием, для чего необходимы устройство высоковольтных линий электропитания, их периодическое обслуживание, регулировка и ремонт. Соблюдение этих требований усугубляется тяжелыми климатическими условиями России и вызывает необходимость содержать большой штат обслуживающего персонала и массу вспомогательного оборудования.

Большое количество используемой системами автоблокировки напольной аппаратуры снижает общую надежность и безопасность управления. Сбои в работе систем повышают психофизиологическую нагрузку на локомотивные бригады и дежурных по станциям.

При втором способе — централизованном регулировании движения поездов — осуществляется переменное включение такого количества блок-участков, которые обеспечивают безопасный минимальный межпоездной интервал. Такие системы нередко называют системами с подвижными блок-участками, поскольку положение безопасного участка между поездами перемещается вместе с их движением [7].

При этом интервальное регулирование выполняется посредством многозначной локомотивной сигнализации без проходных светофоров (например, АЛС-ЕН). Данный способ позволяет повысить пропускную способность железнодорожной линии в условиях предоставления сигнальной информации о состоянии большего числа впередилежащих блок-участков (расстояний до препятствия в виде совокупности находящихся впереди свободных рельсовых цепей) и может быть с минимальными затратами реализован на существующей линии со скоростным движением.

Таким образом, использование второго способа регулирования на линиях с интенсивным движением предоставляет новые возможности для выбора оптимальной скорости подвижных единиц:

на поезд непрерывно поступает информация о фактическом интервале до впередиидущего поезда или точки остановки;

расчет допустимой скорости движения осуществляется с учетом тормозного пути в границах впередилежащих свободных рельсовых цепей;

высокий уровень централизации позволяет управлять объектами, удаленными от поста централизации на 100 км и более, и, как следствие, экономить на капитальных и операционных затратах.

Третий способ — с координатным регулированием — обеспечивает достижение максимальной пропускной способности, поскольку интервал между поездами определяется с учетом динамических характеристик подвижного состава. В основе построения такой СИРДП лежат высокая степень автоматизации и информационные технологии:

применение цифровых каналов обмена данных сокращает стоимость строительства и обслуживания СИРДП, а также открывает ее новые функциональные возможности;

повышение уровня безопасности сводит к минимуму влияние человеческого фактора;

эффективное использование эксплуатационного персонала освобождает его от рутинных работ.

Кроме того, снижаются затраты ресурсов (например, на тяговую энергию или износ рельсов и колесных пар, так как лишнее торможение исключается за счет автоведения поезда).

Внедрение координатной системы интервального регулирования на высокоскоростных железных дорогах является наиболее перспективным и обосновано:

необходимостью обеспечения высокой интенсивности движения с минимально допустимым по условиям безопасности межпоездным интервалом;

регулированием скорости с учетом реальных тормозных характеристик на координату хвоста впередиидущего поезда, а не на границу блок-участка.

Рассмотрим некоторые особенности современных систем интервального регулирования движения, применяемых на линиях с высокоскоростным движением.

Системы интервального регулирования с линиями индуктивной связи позволяют осуществлять контроль свободности участков пути при помощи линии индуктивной связи с проводниками (шлейфами), которые укладываются на шпалах или подшвах рельсов вдоль пути следования поезда (рис. 3). Через определенные интервалы взаиморасположение проводников (шлейфов) меняется за счет их перекрещивания (так называемого транспонирования), чем обеспечивается смена фаз сигнала, поступающего через индуктивно связанный приемник на локомотив при проследовании мест перекрещивания. Таким образом, путем подсчета числа изменений можно установить координату подвижного состава с точностью до L , а при известной длине поезда вычислить и часть занимаемого пути.

Примером практической реализации линий с индуктивной связью на высокоскоростных магистралях является система LZB^{*} фирмы Siemens. В Германии LZB обязательна на всех линиях, где скорость поезда превышает 160 км/ч.

Другой пример использования линии индуктивной связи — комплекс устройств Euroloop который нашел применение в европейской системе интервального регулирования ERTMS и в котором, в отличие от немецкой LZB, для передачи данных линейные кабельные шлейфы задействованы не на всем протяжении пути, а только на отдельных участках (дискретно).

В качестве недостатков использования линий индуктивной связи можно отметить:

необходимость оборудования линий индуктивными петлями;

наличие петель из кабеля на рельсошпальной решетке, усложняющих работы по обслуживанию и ремонту пути;

отсутствие защиты от вандализма и хищений;

слабую защищенность от механического воздействия.

Особенно неблагоприятная ситуация возникает при использовании очень длинных петель, так как при любом обрыве кабеля передача информации на участок прекращается.

Развитие современных технологий привело к изменению принципов интервального регулирования движения поездов

^{*} LZB (с нем.) — линии управления движением поездов.

и созданию системы интервального регулирования с цифровой радиосвязью. То есть существующие системы автоматической локомотивной сигнализации, передающие информацию на борт по рельсопроводному каналу, дополняются цифровым радиоканалом или полностью им заменяются. Значительно увеличивая количество реализуемых функций и интенсивность информационного обмена между всеми подсистемами, эти решения усложняют программное обеспечение как бортовых, так и стационарных систем безопасности. В первую очередь цифровой радиоканал традиционно рассматривается в качестве средства резервирования и дублирования сигналов автоматической локомотивной сигнализации, а также в качестве элемента многоуровневой системы безопасности [8]. Такой подход допускает использование локального цифрового радиоканала с построением децентрализованной (распределенной) системы управления. Ее основное назначение — формирование и передача на борт более детальной и объемной информации о поездной ситуации в пределах одного-двух перегонов небольшой протяженности.

Применение цифрового радиоканала в этом случае позволяет решать целый ряд задач без значительного изменения существующей напольной инфраструктуры. К ним, в частности, относятся исключение влияния кратковременных сбоев АЛСН, повышение скорости движения поездов, возможность передачи на борт информации о постоянных и временных ограничениях скорости.

Рекомендациями Международного союза железных дорог определено использование GSM-R для построения линейных систем поездной радиосвязи и систем интервального регулирования, при этом предъявляются жесткие требования, связанные с резервированием зон радиопокрытия (рис. 4) перегонов и резервированием элементов системы на станциях и в центре управления.

При интервальном регулировании с применением систем спутниковой навигации на всех локомотивах устанавливаются модули ГЛОНАСС. Каждый из модулей воспринимает сигналы спутниковых передатчиков ГЛОНАСС и в результате их обработки определяет координату локомотива.

Однако спутниковая навигация не обладает достаточной надежностью и безошибочностью, что не позволяет перейти к использованию координатной системы управления движением.

Существует несколько проблем, затрудняющих применение систем спутниковой навигации вместо традиционных датчиков контроля свободности пути, таких как рельсовые цепи или системы счета осей. Одна из них обусловлена необходимостью оснащать все обращающиеся на участке поезда устройствами, контролирующими целостность состава. Другая проблема — необходимость закрытия участка, если связь с од-

ним из находящихся на этом участке поездов потеряна.

Общеввропейская система управления и обеспечения безопасности движения поездов ERTMS/ETCS разработана как многофункциональная и может быть реализована в трех уровнях, позволяющих использовать различные эксплуатационные программы в зависимости от степени оснащенности линии напольным оборудованием.

Первый уровень (рис. 5) применяется для существующих железных дорог с напольными светофорами, на которых могут обращаться поезда, не оборудованные устройствами ETCS.

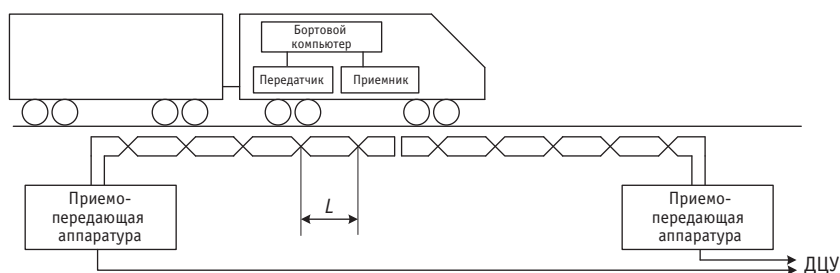


Рис. 3. Структура системы интервального регулирования с линиями индуктивной связи

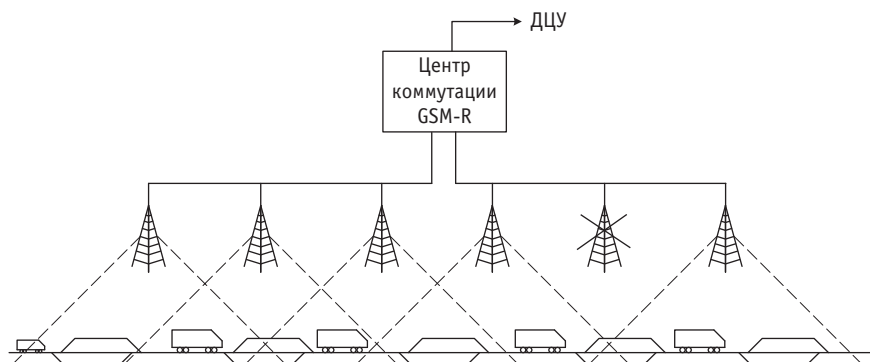


Рис. 4. Зоны радиопокрытия в системах интервального регулирования с цифровой радиосвязью

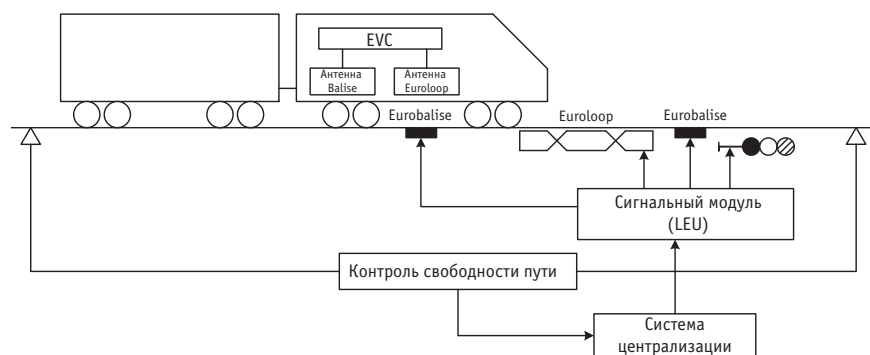


Рис. 5. Структура ERTMS первого уровня

В данном случае к действующей системе добавляются два приемопередатчика Eurobalise. Они управляются установленным у светофора специальным устройством LEU** (Lineside Electronic Unit). Приемопередатчики Eurobalise дополняются подключенным к LEU устройством Euroloop (шлейф), которое во время, когда над ним проезжает поезд, передает информацию на бортовое устройство о показаниях ближайшего по ходу движения светофора.

Второй уровень (рис. 6) применяется на железнодорожных линиях, не имеющих светофорную сигнализацию, на поездах с радиопередающей системой, при помощи которой бортовой компьютер обменивается информацией с центральным пунктом управления. На этом уровне сведения о поездной ситуации передаются на локомотив непрерывно по системе GSM-R.

Шлейфы Euroloop и блоки LEU могут быть демонтированы. Поезда фиксируют свое местоположение с помощью приемопередатчиков Eurobalise, установленных на определенном расстоянии друг от друга. Характеристики пути запрограммированы в бортовом компьютере. Информация о местоположении поезда передается на борт после проезда каждого приемопередатчика.

При третьем уровне (рис. 7) отсутствует путевое оборудование, определяющее местоположение поезда в пути, — местоположение определяется на центральном пункте управления по информации, полученной от поезда по радиоканалу. В этом случае путевой Eurobalise представляет собой электронный маркер километра пути, который передает информацию на движущийся поезд. Параметры железнодорожной линии предварительно заносятся в бортовой компьютер.

Все три рассмотренных уровня совместимы как в функциональном, так и в техническом отношении, т.е. поезд, оборудованный системой верхнего уровня, может обращаться на линии, оборудованной системой более низкого уровня.

К недостаткам системы ERTMS следует отнести:

невозможность достижения потенциального значения межпоездного интервала (кроме ERTMS третьего уровня);

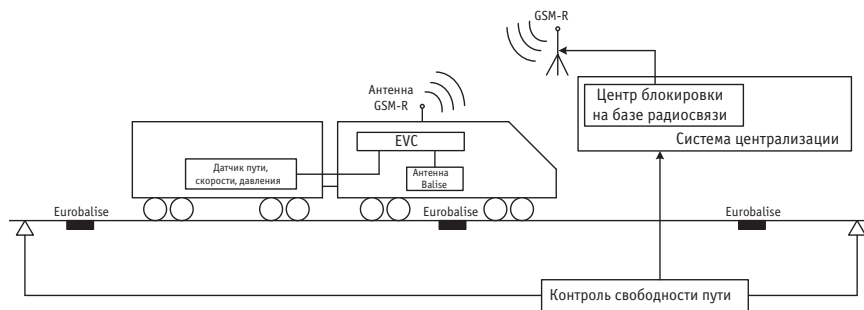


Рис. 6. Структура ERTMS второго уровня

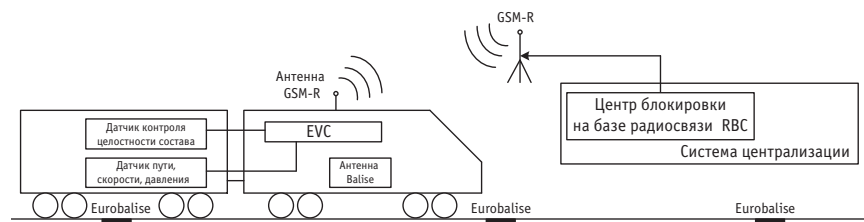


Рис. 7. Структура ERTMS третьего уровня

значительные капитальные вложения в оборудование линий приемопередатчиками Eurobalise и шлейфами Euroloop.

Система ERTMS получила распространение на железных дорогах Европы, Китая, Индии, Тайваня, Южной Кореи и Саудовской Аравии. Она позволяет сокращать расходы, связанные с управлением движением поездов, как на обычных, так и на высокоскоростных линиях, повышает безопасность железнодорожного транспорта, пропускную способность магистралей и обеспечивает действие систем непрерывного автоматического ограждения поездов (ATP) и автоматического управления движением и обеспечения безопасности (ETCS).

Система автоблокировки с централизованным размещением аппаратуры, тональными рельсовыми цепями и дублирующими каналами передачи информации АБТЦ-МШ предназначена для применения на однопутных, двухпутных и многопутных скоростных, магистральных и малодейательных участках железных дорог.

К достоинствам АБТЦ-МШ по сравнению с другими системами централизованной автоблокировки с тональными рельсовыми цепями относятся:

сокращение капитальных затрат на оборудование перегонов, сокращение производственной площади в релей-

ном помещении поста централизации или в контейнерном модуле ЭЦ;

снижение эксплуатационных затрат за счет модульного построения системы и централизованной структуры, повышение надежности за счет применения микропроцессорной и бесконтактной элементной базы и резервирования аппаратуры; повышение помехоустойчивости передачи информации за счет использования частотно-модулированных сигналов и помехоустойчивых кодов;

применение унифицированных современных интерфейсов для организации взаимодействия с другими системами железнодорожной автоматики;

использование цифрового канала радиосвязи для дублирования каналов систем АЛСН и АЛС-ЕН, а также для передачи на локомотивы дополнительной информации.

В целом анализ современных систем интервального регулирования показал, что они имеют следующие общие недостатки: необходимость оборудования участков системой цифровой радиосвязи; невозможность достижения потенциального межпоездного интервала (кроме ERTMS третьего уровня).

Результаты анализа современных систем интервального регулирования по выполняемым ими функциям приведены в табл. 1.

**LEO (с англ.) — линейный электронный блок.

Сравнительный анализ систем управления
и обеспечения безопасности движения поездов

| Основные функции | ERTMS | | | СИРДП на базе АБТЦ-МШ, БЛОК |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| | Первый уровень | Второй уровень | Третий уровень | |
| Напольные светофоры | + | +/- | - | +/- |
| Напольный контроль свободности участков | + | + | - | + |
| Контроль полноразностности поезда | - | - | + | + |
| Подвижные блок-участки | - | - | + | + |
| Локомотивная сигнализация | + | + | + | + |
| Непрерывный контроль скорости | + | + | + | + |
| Непрерывная передача данных | + | + | + | + |
| | (Euroloop) | (по GSM-R) | (по GSM-R) | (по GSM-R) |
| Самодиагностика системы | + | + | + | + |

Таблица 1

Таким образом, анализ технических решений позволил определить перечень обязательных функций, которые необходимо реализовать для безопасного интервального регулирования движения поездов на скоростных и высокоскоростных магистралях:

организация интервального регулирования с подвижными блок-участками; получение, передача и обработка данных от станционных систем централизации или объектных контроллеров на станции; обмен данными с локомотивными устройствами; контроль перегонных и станционных рельсовых цепей; формирование кодов АЛСН/АЛС-ЕН; наличие самодиагностики системы.

Литература

1. Цыденов А. С. Создание высокоскоростных магистралей — залог успеха страны в настоящем и будущем // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 5 (66). С. 10–15. ISSN 1994-831X.
2. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г. Облик высокоскоростной железнодорожной магистрали // Вестник УрГУПС. 2017. № 2 (34). С. 46–56. DOI:10.20291/2079-0392-2017-2-46-56. ISSN 2079-0392.
3. Агафонов Д. В. Анализ целесообразности отделения железнодорожной инфраструктуры высокоскоростных магистралей в Российской Федерации // Наукоедение. 2017. Т. 9. № 1 (38). eISSN 2223-5167.
4. Новые высокоскоростные линии в Китае // Железные дороги мира. 2016. № 8. С. 13–17. ISSN 0321-1495.
5. Могильников Ю. В. Влияние тяжёловесных поездов на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 109–113. ISSN 1815-9400.
6. Никитин А. Б. Управление движением поездов на высокоскоростных магистралях: общесистемные требования // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1 (68). С. 12–17. ISSN 1994-831X.
7. Воронин В. А., Баранов А. Г. Особенности кодирования при использовании подвижных блок-участков // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 7. С. 5–6. ISSN 0005-2329.
8. Розенберг Е. Н., Талалаев В. И. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов // Автоматика, связь, информатика. 2006. № 2. С. 10–12. ISSN 0005-2329.

References

1. Tsydenov A. S. Sozdanie vysokoskorostnykh magistralei — zalog uspekha strany v nastoyashchem i budushchem [Creating high-speed mainlines is key to Russia's success now and in the future] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2016. № 5 (66). S. 10–15. ISSN 1994-831X.
2. Akkerman G. L., Akkerman S. G. Oblik vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali [High-speed railway highlights annotation] // Vestnik UrGUPS. 2017. № 2 (34). S. 46–56. DOI:10.20291/2079-0392-2017-2-46-56. ISSN 2079-0392.
3. Agafonov D. V. Analiz tselesoobraznosti otdeleniya zheleznodorozhnoy infrastruktury vysokoskorostnykh magistralei v Rossiyskoy Federatsii [The analyses of relevancy of the high-speed railways separation in Russian Federation] // Naukovedenie. 2017. T. 9. № 1 (38). eISSN 2223-5167.
4. Novye vysokoskorostnye linii v Kitae [New high-speed lines in China] // Zheleznnye dorogi mira. 2016. № 8. S. 13–17. ISSN 0321-1495.
5. Mogilnikov Yu. V. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rabotu rel'sovykh tsepei i apparatury ALSN [Impact of heavy trains on operation of track circuits and continuous automatic locomotive signaling (CALS) equipment] // Transport Urala. 2014. № 2 (41). S. 109–113. ISSN 1815-9400.
6. Nikitin A. B. Upravlenie dvizheniem poezdov na vysokoskorostnykh magistralyakh: obshchesistemnye trebovaniya [Systemic requirements for train movement control on high-speed mainlines] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2017. № 1 (68). S. 12–17. ISSN 1994-831X.
7. Voronin V. A., Baranov A. G. Osobennosti kodirovaniya pri ispol'zovanii podviznykh blok-uchastkov [Coding peculiarities when using mobile block-sections] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2015. № 7. S. 5–6. ISSN 0005-2329.
8. Rozenberg E. N., Talalaev V. I. Mnogourovnevaya sistema upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov [Multilevel control and safety system for train traffic] // Avtomatika, svyaz', informatika. 2006. № 2. S. 10–12. ISSN 0005-2329.

УДК 656.222.2:656.222.6

Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Эдуард Викторович Васильев, магистрант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Андрей Владимирович Малахов, заместитель начальника службы движения Свердловской дирекции управления движением — структурного подразделения Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия,

Александр Юлианович Ландышев, начальник тягово-энергетической лаборатории Горьковской дирекции тяги, Нижний Новгород, Россия,

Валентин Андреевич Кукушкин, ведущий технолог эксплуатационного локомотивного депо Егоршино Свердловской дирекции тяги, Артемовский, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВУХСИСТЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭВ120 ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОЛИГОНЕ КУЗБАСС — ЦЕНТР

Vadim Yuriyevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Eduard Viktorovich Vasilyev, graduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Andrey Vladimirovich Malakhov, Deputy Head of Movement Service of Sverdlovsk Directorate for Traffic Management — a structural unit of the Central Directorate for Traffic Management — a branch of JSC Russian Railways, Ekaterinburg, Russia,

Alexander Yulianovich Landyshev, Head of Traction and Energy Laboratory, Gorky Thrust Directorate, Nizhny Novgorod, Russia,

Valentin Andreyevich Kukushkin, Leading Technologist, Operational Locomotive Depot of Egorshino, Sverdlovsk Traction Directorate, Artemovskiy, Russia

The research of traction capabilities of a two-system electric locomotive 2EV120 for operation at the Kuzbass-Center testing polygon

Аннотация

Рассмотрены тяговые характеристики инновационного двухсистемного грузового электровоза 2ЭВ120 «Князь Владимир» в сравнении с действующими сериями локомотивов постоянного и переменного тока. Изучены технические особенности полигона тяжеловесного движения Кузбасс — Центр, предлагаемого для эксплуатации электровозов двойного питания.

С помощью программного обеспечения «Тяговый расчет для поездов повышенной массы и длины» определены критическая масса грузового поезда для вождения электровозами серии 2ЭВ120 в двух- и трехсекционном исполнении в условиях лимитирующих подъемов полигона Кузбасс — Центр и сквозная унифицированная весовая норма грузового поезда с электровозом 2ЭВ120.

Ключевые слова: двухсистемный локомотив, тяжеловесное движение, тяговые расчеты, масса поезда, станции стыкования, лимитирующий подъем.

Summary

The traction characteristics of the innovative two-system cargo electric locomotive 2EV120 «Prince Vladimir» are considered in comparison with the current series of locomotives of direct and alternating current. The technical features of the Kuzbass-Center heavy-duty polygon, proposed for the operation of double-feed electric locomotives, were studied.

With the help of the software «Traction calculation for trains with increased mass and length», a critical mass of a freight train for driving electric locomotives of the 2EV120 series in two- and three-sectional design in conditions of limiting lifts of the Kuzbass-Center polygon and a unified weighted standard of a freight train with an electric locomotive 2EV120 is determined.

Keywords: two-system locomotive, heavy-weight traffic, traction calculations, train mass, docking stations, limiting lift.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-41-48

Развитие тяжеловесного движения представляет собой стратегически важную задачу, которая позволит повысить эффективность работы железнодорожного транспорта, пропускную способность важнейших магистральных ходов, уровень производительности труда и снизить эксплуатационные расходы отрасли. Для организации движения тяжеловесных поездов на полигонах сети необходимо реализовать программу мероприятий, направленных на комплексное развитие элементов инфраструктуры — пути, контактной сети, устройств СЦБ, вагонного парка, железнодорожных станций и др. Особого внимания требует локомотивное хозяйство, так как постоянная эксплуатация поездов повышенной массы и длины невозможна без современного мощного тягового подвижного состава.

В последние годы в рамках инвестиционной программы ОАО «РЖД» выделяются значительные денежные средства на обновление локомотивного парка. Так, в период с 2012 по 2016 г. для грузового движения закуплено 129 электровозов серии 2ЭС10 «Гранит», 415 — серии 2ЭС6 «Синара», 66 — 2ЭС4к «Дончак», 46 — 3ЭС4к «Дончак», 80 — 2ЭС5к «Ермак», 542 — 3ЭС5к «Ермак», 3 — 4ЭС5к «Ермак», 5 — 2ЭС5 «Скиф», 1 — 2ЭС7 «Гранит». В 2017 г. компания потратит 57,2 млрд руб. на приобретение 450 локомотивов, из них 189 — это грузовые электровозы: 51 — серии 2ЭС5к, 45 — 3ЭС5к, 4 — 3ЭС4к, 5 — 4ЭС4к, 74 — 2ЭС6, 10 — 2ЭС10. Но, несмотря на значительное обновление, в эксплуатации остается большое количество физически и морально устаревших локомотивов предыдущих поколений: ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80 и др., тяговые и эргономические характеристики которых не соответствуют ни дальнейшему развитию тяжеловесного движения, ни комфортным условиям труда локомотивных бригад.

С позиции тягового обслуживания классификация сети железных дорог России включает три основные системы: это электротяга постоянного тока напряжением 3 кВ, переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц и автономная (тепловозная) тяга. Такое разнообразие стандартов привело к тому, что при электрификации возникла необходимость в создании станций стыкования на границах участков постоянного и переменного тока. Эти станции являются своего рода барьером при пропуске поездопотока, что обусловлено обязательной сменой электровозов одного вида тока на другой. Сегодня таких станций 27, большинство из них расположены на важнейших грузонапряженных направлениях, соединяющих крупнейшие бассейны добычи угля, руды, углеводородов с предприятиями перерабатывающей промышленности, морскими портами и су-

хопутными пограничными переходами [1]. Вынужденные технические стоянки для смены локомотивов на станциях стыкования отрицательно влияют на важнейшие бюджетные показатели работы — участковую и маршрутную скорость.

Инновационным решением для развития тяжеловесного движения на полигонах, в маршруты которых входят участки железных дорог, электрифицированных как постоянным, так и переменным током, может стать грузовой электровоз двойного питания 2ЭВ120 «Князь Владимир», созданный на Энгельсском локомотивном заводе — совместном предприятии ООО «Первая Локомотивная Компания» и канадской машиностроительной компании Bombardier Transportation [2].

Следует отметить, что первый отечественный двухсистемный электровоз ВЛ82 № 001 произведен еще в 1966 г. на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ). До 1979 г. выпущен 91 электровоз этой серии, 55 из которых эксплуатируются до сих пор на территории Украины, остальные списаны либо законсервированы.

С 1998 по 2006 г. тем же заводом в Новочеркасске выпущены для пассажирского движения 12 двухсистемных электровозов серии ЭП10, находящихся в данный момент на консервации.

На смену им пришли более совершенные скоростные двухсистемные машины серии ЭП20 «Олимп». За 6 лет, с 2011 по 2016 г., НЭВЗ произвел 56 электровозов, которые успешно эксплуатируются на многих направлениях с различным родом тока в контактной сети.

Новочеркасским электровозостроительным заводом совместно с компанией Alstom разработан проект двухсистемного асинхронного грузового электровоза 2ЭС20 на базе электровоза 2ЭС5 «Скиф». Однако опытную модель создать не удалось ввиду высокого курса евро по отношению к рублю и большой загруженности производственных мощностей предприятия, выпускающего по заказу ОАО «РЖД» односистемные коллекторные электровозы.

Создание в августе 2015 г. инновационного двухсистемного грузового электровоза пятого поколения серии 2ЭВ120 «Князь Владимир», не имеющего аналогов на «пространстве 1520», вписывается в концепцию развития тяжеловесного движения, в первую очередь на железнодорожных магистральных ходах, электрифицированных как постоянным, так и переменным током [3]. Электровоз в двухсекционном исполнении оборудован 8 асинхронными тяговыми электродвигателями. Для сравнения в табл. 1 приведены основные технические характеристики эксплуатируемых на сети дорог серий локомотивов и электровоза 2ЭВ120.

Таблица 1

Основные технические характеристики магистральных грузовых электровозов

| Показатель | Электровозы постоянного тока (номинальное напряжение 3 кВ) | | | | | | | | |
|--|--|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------|---------------|-----------|-----------------|
| | 2ЭС10 «Гранит» | 3ЭС10 «Гранит» | 2ЭС6 «Синара» | 2ЭС4к «Дончак» | 3ЭС4к «Дончак» | ВЛ15 | ВЛ11/ ВЛ10 | 1,5ВЛ11 | 2ВЛ11/ 2ВЛ10 |
| Тип ТЭД | Асинхронный | | | Коллекторный | | | | | |
| Максимальная эксплуатационная скорость, км/ч | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Осевая формула | 2 (2о-2о) | 3 (2о-2о) | 2 (2о-2о) | 2 (2о-2о) | 3 (2о-2о) | 2 (2о-2о-2о) | 2 (2о-2о) | 3 (2о-2о) | 4 (2о-2о) |

Окончание табл. 1

| Показатель | Электропоезда постоянного тока (номинальное напряжение 3 кВ) | | | | | | | | |
|---|--|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------|---------------|---------|-----------------|
| | 2ЭС10 «Гранит» | 3ЭС10 «Гранит» | 2ЭС6 «Синара» | 2ЭС4к «Дончак» | 3ЭС4к «Дончак» | ВЛ15 | ВЛ11/ ВЛ10 | 1,5ВЛ11 | 2ВЛ11/ 2ВЛ10 |
| Тип ТЭД | Асинхронный | | | Коллекторный | | | | | |
| Служебная масса с 2/3 запаса песка, т | 200 | 300 | 200 | 192 | 300 | 300 | 184 | 276 | 368 |
| Длина локомотива, м | 34 | 51 | 34 | 35 | 52,5 | 45 | 33 | 49 | 66 |
| Скорость часового режима, км/ч | 50 | 50 | 49,2 | 52 | 52 | 46,8 | 48,7 | 48,7 | 48,7 |
| Скорость длительного режима, км/ч | 55 | 55 | 51 | 53,4 | 53,4 | 47,9 | 51,2 | 51,2 | 51,2 |
| Статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН | 249 | 249 | 245 | 235 | 235 | 245 | 225,4 | 225,4 | 225,4 |
| Максимальная (часовая) мощность на валах ТЭД (на ободе колесных пар), кВт | 8800 | 13200 | 6440 | 6400 | 9300 | 9000 | 5360 | 8040 | 10720 |
| Мощность на валах ТЭД в продолжительном режиме, кВт | 8400 | 12600 | 6000 | 5735 | 8600 | 8400 | 4600 | 6900 | 9200 |
| Сила тяги на ободе колесных пар в продолжительном режиме, кН | 538 | 807 | 466 | 391 | 586 | 609,4 | 313,6 | 470,4 | 627,2 |
| Максимальная сила тяги (часового режима) на ободе колесных пар при трогании с места, кН | 784 | 1176 | 667 | 434 | 651 | 675 | 387 | 581 | 774 |
| КПД в продолжительном режиме при работе на переменном токе, % | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет |
| КПД в продолжительном режиме при работе на постоянном токе, % | 87,5 | 89 | 86 | 88 | 88 | 86 | 88 | 88 | 88 |

| Показатель | Электропоезда переменного тока (25 кВ — 50 Гц) | | | | | | | | Двухсистемные электропоезда «Князь Владимир» | |
|---|--|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------|-----------|-----------|--|-----------|
| | 2ЭС7 | 2ЭС5 «Скиф» | 2ЭС5к «Ермак» | 3ЭС5к «Ермак» | 4ЭС5к «Ермак» | ВЛ85 | 1,5 ВЛ80с | ВЛ80 | 2ЭВ120 | 3ЭВ120 |
| Тип ТЭД | Асинхронный | | Коллекторный | | | | | | Асинхронный | |
| Максимальная эксплуатационная скорость, км/ч | 120 | 120 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 120 | 120 |
| Осевая формула | 2 (20-20) | 2 (20-20) | 2 (20-20) | 3 (20-20) | 4 (20-20) | 2 (20-20-20) | 3 (20-20) | 2 (20-20) | 2 (20-20) | 3 (20-20) |
| Служебная масса с 2/3 запаса песка, т | 200 | 200 | 192 | 288 | 384 | 288 | 288 | 192 | 200 | 300 |
| Длина локомотива, м | 34 | 35 | 35 | 52,5 | 70 | 45 | 49 | 33 | 37 | 51 |
| Скорость часового режима, км/ч | 50 | 45 | 49,9 | 49,9 | 49,9 | 49,1 | 51,6 | 51,6 | 120 | 120 |
| Скорость длительного режима, км/ч | 55 | 50 | 51 | 51 | 51 | 50 | 53,6 | 53,6 | 52,8 | 52,8 |
| Статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН | 249 | 245 | 235 | 235 | 235 | 225,4 | 235 | 235 | 245 | 245 |
| Максимальная (часовая) мощность на валах ТЭД (на ободе колесных пар), кВт | 8800 | 8800 | 6560 | 9840 | 13120 | 10020 | 9780 | 6520 | 9600 | 14400 |
| Мощность на валах ТЭД в продолжительном режиме, кВт | 8400 | 8400 | 6120 | 9180 | 12240 | 9360 | 9240 | 6160 | 8800 | 13200 |
| Сила тяги на ободе колесных пар в продолжительном режиме, кН | 538 | 536 | 423 | 634 | 846 | 659,34 | 600 | 400 | 600 | 900 |
| Максимальная сила тяги (часового режима) на ободе колесных пар при трогании с места, кН | 784 | 690 | 464 | 696 | 928 | 725 | 663 | 442 | 700 | 1050 |
| КПД в продолжительном режиме при работе на переменном токе, % | 88 | 86 | 85 | 85 | 85 | 86 | 84 | 84 | 86 | 86 |
| КПД в продолжительном режиме при работе на постоянном токе, % | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | Нет | 88 | 88 |

Из анализа табл. 1 видно, что электровоз 2ЭВ120 за счет асинхронного привода показывает лучшие тяговые характеристики, чем электровозы предыдущих поколений, использующие коллекторный тип тяговых электродвигателей. Кроме того, по мощности тяговых двигателей в двигательном режиме 2ЭВ120 сравним с другими локомотивами, оснащенными асинхронными тяговыми двигателями.

В настоящее время наиболее распространенными на горно-перевальных участках сериями локомотивов для организации движения поездов массой брутто до 9000 т являются электровозы ЗЭС10 «Гранит», 2ВЛ10к, 1,5ВЛ80с. В сопоставлении с ними 2ЭВ120 может осуществлять вождение поездов массой 9000 т в зависимости от продольного профиля пути и в двух-, и в трехсекционном исполнении.

В качестве пилотного полигона для эксплуатации электровоза 2ЭВ120 «Князь Владимир» рассмотрен полигон тяжеловесного движения Кузбасс — Центр, электрифицированный как постоянным током (участки Иртышское — Колчедан — Дружинино, Вековка — Бекасово-Сорт. — Вязьма, Вековка — Орехово-Зуево), так и однофазным переменным (среднесибирский ход: Алтайская — Иртышское, южный ход Горьковской железной дороги: Дружинино — Вековка, участок Вязьма — Смоленск). На полигоне расположены 4 станции стыкования родов тока: Иртышское, Дружинино, Вековка, Вязьма, беспрепятственное проследование которых двухсистемными электровозами позволит увеличить маршрутную скорость ведомых ими поездов, а также улучшить основные качественные и объемные показатели работы полигона в целом.

В основу представленного на полигоне грузопотока нечетного направления входят транссибирские ускоренные контейнерные поезда, значительный немаршрутный вагонопоток, а также массовые грузы — уголь и кокс Кузбасса (перевозятся поездами массой 6300 и 9000 т), углеводороды Западной Сибири (перевозятся поездами массой 6300 т с перспективой ввода в обращение поездов массой 9000 т) и др. В четном направлении преимущественно следуют порожние составы (полувагоны и цистерны, возвращаемые на погрузочные станции Кузбасса, Сургутского региона), а также ускоренные контейнерные поезда и большой разборочный вагонопоток.

Горьковская железная дорога, входящая в состав полигона, является пионером в организации движения тяжеловесных поездов массой 9000 т. Успешный опыт, достигнутый в 2007 г. при формировании и продвижении таких составов на протяженном участке южного хода Зюря — Вековка, позволил в 2010 г. внедрить сквозную технологию пропуска, впоследствии ставшую полигонной.

Ежедневно по полигону Кузбасс — Центр следует до 60 пар грузовых поездов. Техническое развитие инфраструктуры полигона позволяет осуществлять пропуск 12 поездов массой до 9000 т по сквозной технологии от Алтайской до Бекасово-Сорт. и Орехово-Зуево с использованием безобгонных ниток сводного графика. Унифицированная масса грузового поезда в нечетном направлении составляет 6300 т на среднесибирском ходу от Алтайской до Входной и на южном обходе Екатеринбург: Арамил — Седельниково — Решеты. На направлениях Входная — Курган — Каменск-Уральский — Арамил, Решеты — Дружинино, южном

ходу Горьковской железной дороги от Дружинино до Вековки и на участке Вековка — Орехово-Зуево унифицированная масса равна 6000 т, а на участке Вековка — Бекасово-Сорт. — 5200 т.

Важнейшее условие эксплуатации двухсистемных электровозов на полигоне — вождение грузовых поездов повышенной массы и длины.

Тяговые возможности электровоза 2ЭВ120 «Князь Владимир» определены с помощью расчетов, выполненных с использованием специализированного программного комплекса «Тяговый расчет для поездов повышенной массы и длины», разработанного в 2016 г. в УРГУПС [4].

Актуальность программы проверена при исследовании тягового потенциала электровоза ЗЭС10 «Гранит» на участках Свердловской железной дороги путем сопоставления полученных выводов с результатами экспериментальных поездок с тягово-энергетической лабораторией [5]. При выполнении расчетов комплекс учитывает уклоны продольного профиля участка, действующие скорости движения и ограничения в соответствии с дорожными приказами. Программа позволяет строить график зависимости скорости движения от продольного профиля участка, наглядно демонстрирующий тяговые возможности тестируемого локомотива с поездом заданной массы, а также рассчитывать перегонное время хода. Алгоритм работы программного комплекса основан на действующих правилах выполнения тяговых расчетов.

Ключевым элементом в определении тяговых возможностей локомотивов на конкретном сетевом направлении является продольный профиль пути, который на полигоне Кузбасс — Центр разнообразен и представлен как равнинными (Западно-Сибирская, Восточно-Европейская равнины), так и горно-перевальными участками (Уральские горы, Сылвинский кряж, Приволжская, Смоленско-Московская возвышенности).

Ввиду большой протяженности полигона исследования проводились на участках с лимитирующими подъемами, полученные данные сравнивались с результатами, показанными действующим парком электровозов.

Проведенным анализом установлены элементы продольного профиля с наихудшими условиями для движения поездов, определены перегоны и участки их нахождения. Таким образом, были выбраны перегоны Ревда — Ильмовка, Дружинино — Солдатка, участки Красноуфимск — Чад и Зеленый Дол — Тюрлема. В целях ужесточения условий расчета предусмотрено движение поездов со стоянки с благоприятного профиля перед подъемом (начальная скорость 0 км/ч). В расчетах не учитывались кратная тяга и подталкивание, а для электровоза серии 2ЭВ120 — применение бустерного режима.

Перегон Ревда — Ильмовка протяженностью 29 км пересекает Уральские горы, электрифицирован постоянным током, характеризуется наличием затяжного лимитирующего подъема с максимальным уклоном 9,3‰. В настоящее время вождение поездов массой до 6300 т производится электровозами серии ЗЭС10 и 1,5ВЛ11. Составы повышенной массы и длины до 9000 т водят локомотивы 2ВЛ10к и 2ВЛ11к (реже ЗЭС10). При неблагоприятных погодных условиях (осадки в виде дождя и снега) применяется кратная тяга путем постановки в голову поездам массой 9000 т на станциях Решеты или Седельниково еще одного электровоза 2ВЛ10к (2ВЛ11к).

Перегон Дружинино — Солдатка протяженностью 6 км электрифицирован переменным током и расположен на подъеме. После смены электровозов на станции Дружинино нечетные поезда массой до 6300 т следуют с локомотивами ВЛ80с, а массой до 9000 т — с локомотивом 1,5ВЛ80с. В границах станции на 1571-м км расположен подъем с уклоном 6,9‰, что вызывает потребность в подталкивании отправляемых грузовых поездов массой свыше 5800 т для электровозов ВЛ80с и свыше 8000 т — для локомотивов 1,5ВЛ80с. Подталкивание выполняется двумя электровозами серии ВЛ80с и осуществляется до границы станции (1569 км 6 пк), а при неблагоприятных погодных условиях или ограничении скорости на перегоне менее 40 км/ч по требованию машиниста ведущего локомотива — до станции Солдатка.

Участок Красноуфимск — Чад протяженностью 48 км электрифицирован переменным током, пересекает Сылвинский край Западного Урала и характеризуется наличием подъемов крутизной до 9,1‰. В состав участка в нечетном направлении входят перегоны Красноуфимск — Саранинский Завод, Саранинский Завод — Пудлингов, Пудлингов — Черная Речка, Черная Речка — Чад. В грузовом движении с поездами массой до 6300 т эксплуатируются электровозы ВЛ80с, до 9000 т — 1,5ВЛ80с. Из-за лимитирующего подъема на участке Красноуфимск — Черная Речка выполняется подталкивание грузовых поездов, ведомых электровозом ВЛ80с, при массе более 5800 т, и ведомых электровозом 1,5ВЛ80с, если масса состава превышает 7500 т. При неблагоприятных погодных условиях или ограничении скорости менее 40 км/ч по заявке машиниста ведущего локомотива разрешается подталкивание до станции Чад. Для подталкивания используются 4 электровоза серии ВЛ80с с возможностью вызова еще двух дополнительных машин по указанию поездного диспетчера Дружининского участка при большом подходе тяжеловесных поездов.

Участок Зеленый Дол — Тюрлема протяженностью 33 км пересекает Приволжскую возвышенность, электрифицирован переменным током и состоит из перегонов Зеленый Дол — Свияжск и Свияжск — Тюрлема. Продольный профиль нечетного пути перегона Свияжск — Тюрлема представляет собой затяжной подъем с уклоном 7,2‰ и наличием элементов до 9,1‰. Вождение поездов массой до 6300 т осуществляется электро-

возами серии ВЛ80с, при массе до 9000 т — 1,5ВЛ80с. В связи с наличием руководящего подъема на участке осуществляется подталкивание нечетных поездов, ведомых электровозами серии ВЛ80с, массой более 5200 т, а при неблагоприятных погодных условиях, остановке на станции Свияжск и ограничении скорости на подъеме менее 40 км/ч — массой более 5000 т. Требуется также подталкивание грузовых поездов массой более 7500 т, ведомых электровозами 1,5ВЛ80с. На участке работают 5 толкачей серии ВЛ80с с возможностью вызова еще двух дополнительных машин по указанию поездного диспетчера Юдинского участка при большом подходе тяжеловесных поездов.

Результат исследований тяговых возможностей электровоза ЭВБ120 в сравнении с другими сериями локомотивов на перегоне Ревда — Ильмовка Екатеринбургского региона Свердловской железной дороги представлен на рис. 1.

Расчетами установлено, что электровоз ЭВБ120 в двухсекционном исполнении при движении с поездом массой 9000 т при нормативе перегонного времени хода 34 мин следует по перегону Ревда — Ильмовка 48 мин. При этом скорость движения в конце подъема составляет менее 20 км/ч (см. рис. 1). В случаях, вызванных неблагоприятными погодными условиями, неправильными действиями машиниста или некачественной регулировкой поездного диспетчера, возникает риск остановки поезда на подъеме, и, как следствие, требуется вспомогательный локомотив. Для организации движения поездов повышенной массы (до 9000 т) на этом перегоне необходимо использовать трехсекционный электровоз ЭВБ120 с бустерной секцией или применять кратную тягу.

Результаты исследования тяговых характеристик электровоза ЭВБ120 и электровозов других серий на перегоне Дружинино — Солдатка Ижевского региона Горьковской железной дороги представлены на рис. 2.

Установлено, что электровоз ЭВБ120 в двухсекционном исполнении способен везти поезд массой брутто до 9000 т без применения подталкивающего локомотива, а при безостановочном следовании по станции Дружинино (при условии оборудования контактной сети нейтральными вставками) — уменьшить перегонное время хода за счет более высокой (до 40 км/ч) начальной скорости.

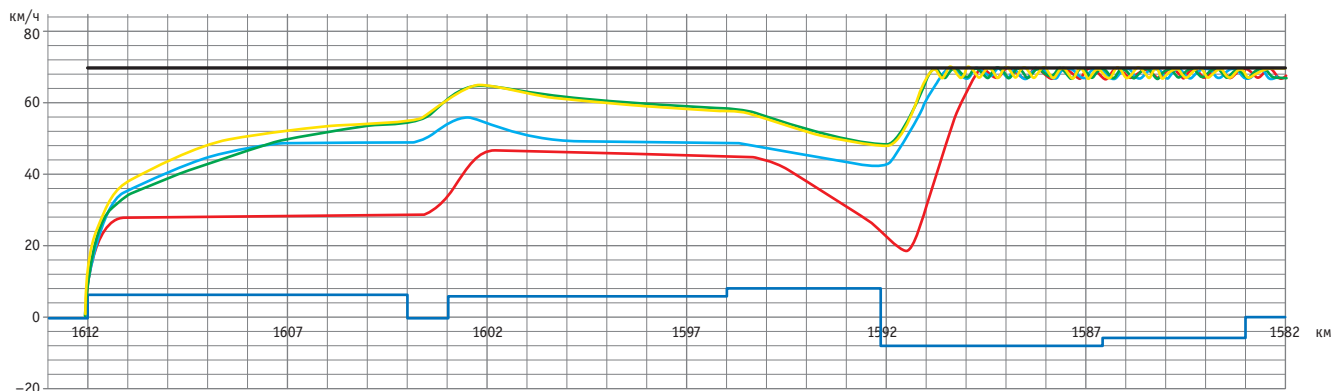


Рис. 1. График тяговых расчетов электровоза ЭВБ120 и действующих локомотивов на перегоне Ревда — Ильмовка (нечетное направление):
— 2ЭС10 6300 т; — 2ВЛ10К 9000 т; — ЭВБ120 9000 т; — ЭВБ120 7300 т; — профиль; — ограничение

График тяговых характеристик электровозов на участке Красноуфимск — Черная Речка — Чад Ижевского региона Горьковской железной дороги представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, на данном направлении тяговые характеристики двухсекционного электровоза 2ЭВ120 приблизительно равны возможностям локомотива ВЛ80с в трехсекционном исполнении, что соответствует массе брутто ведомого им грузового поезда 9000 т, но не требует подталкивания.

Тяговые возможности электровоза 2ЭВ120 на участке Зеленый Дол — Тюрлема Казанского региона Горьковской железной дороги представлены на рис. 4.

На данном участке электровоз 2ЭВ120 не способен преодолеть лимитирующий подъем с поездом массой 9000 т, скорость движения в конце подъема стремится к нулю. То есть здесь для пропуска поездов повышенной массы и длины требуется электровоз 2ЭВ120 в трехсекционном исполнении (бустерная секция) или подталкивающий локомотив.

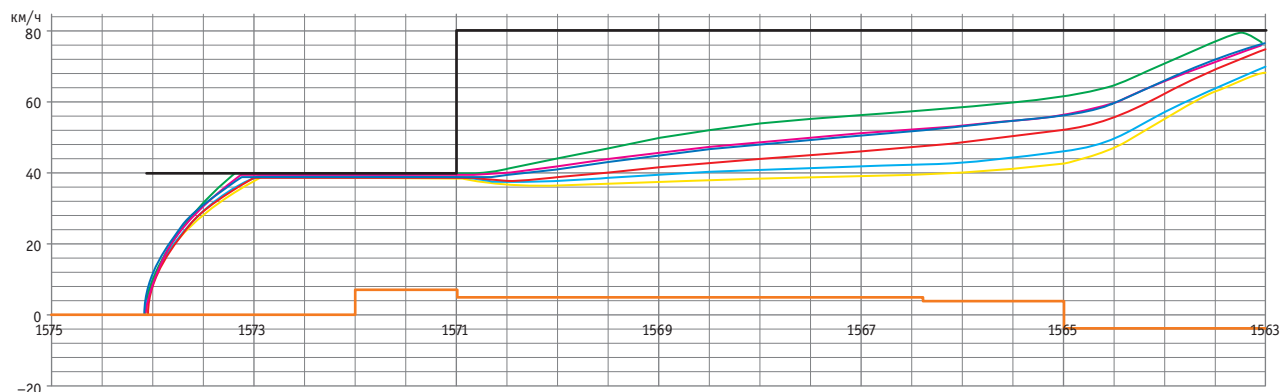


Рис. 2. График тяговых расчетов электровоза 2ЭВ120 и других локомотивов на перегоне Дружинино — Солдатка:

— 2ЭВ120 9000 т; — 2ЭВ120 7300 т; — ВЛ80с 6300 т; — ВЛ80с 5800 т; — 1,5ВЛ80с 9000 т; — профиль; — ограничение

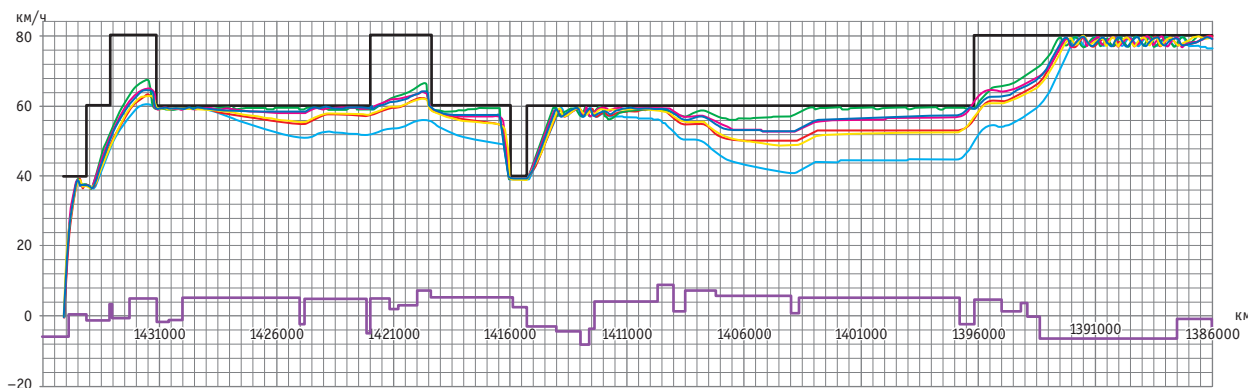


Рис. 3. График тяговых расчетов электровоза 2ЭВ120 и других локомотивов на участке Красноуфимск — Чад (нечетный путь):

— 2ЭВ120 9000 т; — 2ЭВ120 7300 т; — ВЛ80с 6300 т; — ВЛ80с 5800 т; — 1,5ВЛ80с 9000 т; — профиль; — ограничение

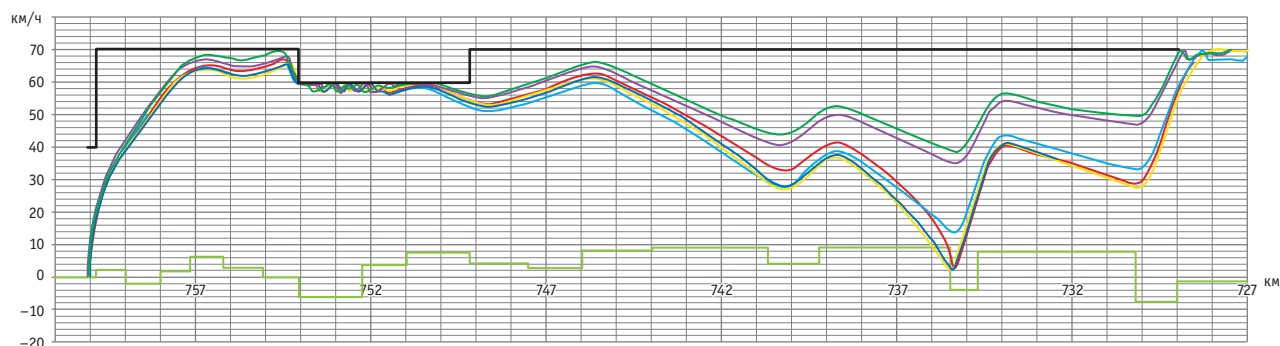


Рис. 4. График тяговых расчетов электровоза 2ЭВ120 и других локомотивов на участке Зеленый Дол — Тюрлема (нечетный путь):

— 2ЭВ120 9000 т; — 2ЭВ120 7300 т; — ВЛ80с 6300 т; — ВЛ80с 5800 т; — 1,5ВЛ80с 9000 т; — ограничение; — профиль

Итак, исследования, выполненные с помощью программы «Тяговый расчет для поездов повышенной массы и длины», показали, что возможны следующие варианты эксплуатации двухсистемного электровоза серии 2ЭВ120 на полигоне Кузбасс — Центр для вождения поездов массой до 9000 т:

а) в двухсекционном исполнении — на равнинном участке от станции Алтайской (Западно-Сибирская ж.д.) до Седельниково (Свердловская ж.д.) с безостановочным проследованием одной станции стыкования — Иртышское;

б) в трехсекционном исполнении — на горно-перевальном участке от станции Седельниково до Орехово-Зуево или Смоленска-Сорт. через Бекасово-Сорт. (Московская ж.д.) с безостановочным проследованием двух станций стыкования — Дружинино, Вязьма — и сокращенной стоянкой на станции Вековка без применения подталкивающих локомотивов;

в) в трехсекционном исполнении — на всем полигоне от Алтайской до Орехово-Зуево или Смоленска-Сорт. с безостановочным проследованием трех станций стыкования — Иртышское, Дружинино, Вязьма — и сокращенной стоянкой на станции Вековка без применения подталкивающих локомотивов;

г) в двухсекционном исполнении — на всем полигоне от Алтайской до Орехово-Зуево или Бекасово-Сорт. без применения подталкивания на перегоне Дружинино — Солдатка, участке Красноуфимск — Чад, с использованием локомотивов-толкачей на участке Зеленый Дол — Свияжск, с организацией подталкивания или кратной тяги на участке Седельниково (Решеты) — Дружинино. Для определения тяговых возможностей двухсекционного электровоза 2ЭВ120 на участке Бекасово-Сорт. — Вязьма — Смоленск-Сорт. требуется проведение исследований тяговых характеристик электровоза на перегоне Бородино — Уваровка Московской ж.д.

Для проверки выводов, полученных по результатам программного изучения, а также определения весовых норм на двухсекционный локомотив 2ЭВ120 проведено их сопоставление с результатами программных исследований и итогов многовариантных тяговых расчетов, выполненных в ООО «Первая Локомотивная Компания» (рис. 5) [6].

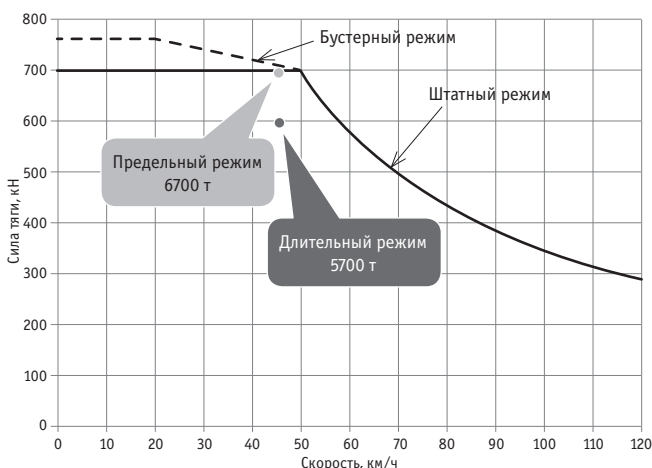


Рис. 5. Определение максимальной массы состава на электровозы серии 2ЭВ120 по участкам с расчетным подъемом до 9 ‰

Как видно из рис. 5, максимальная масса грузового поезда при движении по участку с расчетным подъемом 9 ‰, установленная специалистами ООО «Первая Локомотивная Компания», составляет 6700 т, что ниже, чем рассчитанная программой для полигона Кузбасс — Центр. Это связано с тем, что заводом-изготовителем учтены и тепловые характеристики оборудования локомотива (табл. 2).

Таблица 2

Термические параметры оборудования электровоза 2ЭВ120 при тяге поездов различной массы по участку с расчетным подъемом 9 ‰, °C

| Параметр | Поезда массой, т | | Предел |
|---|------------------|-------|--------|
| | 5700 | 6700 | |
| Температура масла тягового трансформатора | 85,0 | 86,9 | 105,0 |
| Температура первичной обмотки тягового трансформатора | 118,1 | 120,6 | 155,0 |
| Температура тяговой обмотки тягового трансформатора | 113,7 | 116,2 | 155,0 |
| Превышение температуры обмотки статора тягового двигателя | 133,6 | 165,6 | 200,0 |
| Превышение температуры обмотки ротора тягового двигателя | 138,8 | 176,6 | 220 |
| Температура охлаждающей жидкости тягового преобразователя | 59,0 | 59,7 | 60,0 |

Примечание. Приведены результаты расчетов при температуре наружного воздуха +45 °C.

Согласно расчетам завода-изготовителя, максимальная масса грузового поезда при движении по участку с расчетным подъемом 9 ‰ при температуре наружного воздуха +45 °C составляет 6700 т. В нормативных документах дорожного уровня, устанавливающих максимальную весовую норму на участках для локомотивов различных серий, определена зависимость массы грузового поезда от температуры наружного воздуха. Она предусматривает снижение максимальной массы поезда на 5 % при температуре наружного воздуха от +30 до +40 °C и на 10 % — при температуре свыше +40 °C.

В нормальных температурных условиях внешней среды для участков с тяжелым профилем пути полигона Кузбасс — Центр эта масса может быть увеличена на 10 % и составит 7300 т без применения подталкивающих локомотивов на всем протяжении полигона (табл. 3).

ВЫВОДЫ

1. Поэтапная замена физически и морально устаревших электровозов 1,5ВЛ11 Свердловской дирекции тяги, ВЛ80с Горьковской дирекции тяги, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ10у Московской дирекции тяги двухсекционными электровозами 2ЭВ120 с закреплением работы на плече Седельниково (Екатеринбург-Сорт.) — Дружинино — Вековка — Орехово-Зуево (Бекасово-Сорт.) позволит повысить максимальную массу грузового поезда на полигоне Кузбасс — Центр с 6300 до 7000 т (максимальная весовая норма на участке Алтайская — Иртышское для электровоза

Таблица 3

Весовые нормы полигона Кузбасс — Центр, т

| Участок | Серия локомотива | | | | | | | | | | Унифицированная полигонная весовая норма при эксплуатации 2ЭВ120 |
|---|------------------|---------|-------------------|------|-------|-------|-------|----------|--------|--------|--|
| | ВЛ10, ВЛ11 | 1,5ВЛ11 | 2ВЛ10к, 2ВЛ11к | 2ЭС6 | 2ЭС10 | 3ЭС10 | ВЛ80с | 1,5ВЛ80с | 2ЭВ120 | 3ЭВ120 | |
| Алтайская — Иртышское | — | — | — | — | — | — | 7000 | 9000 | 9000 | 9000 | 7000 |
| Иртышское — Курган — Седельниково (Екатеринбург) | 7000 | — | 9000 | 7800 | — | — | — | — | 9000 | 9000 | 7000 |
| Седельниково (Екатерин- бург) — Дружинино | 4500 | 6300 | 9000 | 5100 | 6300 | 9000 | — | — | 7300 | 9000 | 7000 |
| Дружинино — Вековка | — | — | — | — | — | — | 6300 | 9000 | 7300 | 9000 | 7000 |
| Вековка — Бекасово-Сорт. | 6000 | 9000 | 9000 | — | — | — | — | — | 7300 | 9000 | 7000 |
| Бекасово-Сорт. — Вязьма | 6300 | 7500 | 9000 | — | — | — | — | — | 7300 | 9000 | 7000 |
| Вязьма — Смоленск-Сорт. | — | — | — | — | — | — | 5500 | 9000 | 7300 | 9000 | — |
| Вековка — Орехово-Зуево | 7000 | 9000 | — | — | — | — | — | — | 7300 | 9000 | 7000 |

ВЛ80с), перераспределить парк электровозов 2ЭС10 на направление Седельниково (Екатеринбург-Сорт.) — Базезино, увеличить протяженность плеч работы локомотивных бригад от Седельниково (Екатеринбург-Сорт.) до Красноуфимска (Зюрги), увеличить маршрутную скорость движения грузовых поездов за счет безостановочного пропуска по станции Дружинино и сокращения стоянки по станции Вековка (смена локомотивной бригады вместо смены локомотива).

2. Для вождения поездов массой до 9000 т по сквозной полигонной технологии от Алтайской до Орехово-Зуево (Бекасово-Сорт.) рекомендованы электровозы 2ЭВ120 в трехсекционном

исполнении (с бустерной секцией). С целью обеспечения безопасности движения эти локомотивы должны быть оборудованы системами управления тормозами поезда (СУТП) или распределенного управления тормозами (РУТП).

3. Итоговые значения максимальных весовых норм, интервалов попутного следования и других параметров, определяющих условия эксплуатации двухсистемных электровозов на полигоне тяжеловесного движения Кузбасс — Центр, могут быть установлены по данным опытных поездок с вагонами — тягосовместимыми лабораториями и по результатам практических экспериментов.

Литература

1. Малахов А. В., Пермикин В. Ю., Васильев Э. В. Повышение эффективности работы стыковых станций и смежных участков при эксплуатации в грузовом движении электровозов двойного питания // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 32–36. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-32-36. ISSN 1815-9400.
2. Знакомьтесь: электровоз 2ЭВ120 // Локомотив. 2015. № 11 (707). С. 42–45. ISSN 0869-8147.
3. Опытные рейсы электровоза 2ЭВ120-001 // Локомотив. 2016. № 7 (715). С. 39. ISSN 0869-8147.
4. Тяговый расчет для поездов повышенной массы и длины / В. А. Кукушкин, Д. Л. Худояров : прогр. для ЭВМ 2016618572 Рос. Федерация. № 2016615969 ; заявл. 08.06.16 ; зарег. 02.08.16 ; опубл. 20.08.16.
5. Бегагоин Э. И., Худояров Д. Л., Кукушкин В. А. Сравнительный анализ тяговых свойств грузовых электровозов ВЛ11, 2ЭС6, 2ЭС10 // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 105–109. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-105-109. ISSN 1815-9400.
6. Первая Локомотивная Компания [Сайт]. URL: <http://1-plk.com/> (дата обращения: 15.04.2017).

References

1. Malakhov A. V., Permikin V. Yu., Vasilyev E. V. Povyshenie effektivnosti raboty stykovykh stantsiy i smezhnykh uchastkov pri ekspluatatsii v gruzovom dvizhenii elektrovovozov dvoynogo pitaniya [Improvement of efficiency of work of butt-joint stations and contiguous section in operation in the traffic movement of locomotive of double supply] // Transport Urala. 2017. № 2 (53). S. 32–36. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-32-36. ISSN 1815-9400.
2. Znakom'tes': elektrovovoz 2EV120 [Meet the electric locomotive 2EV120] // Lokomotiv. 2015. № 11 (707). S. 42–45. ISSN 0869-8147.
3. Opytnye reysy elektrovovoz 2EV120-001 [Experimental routes of electric locomotive 2EV120-001] // Lokomotiv. 2016. № 7 (715). S. 39. ISSN 0869-8147.
4. Tyagovyy raschet dlya poezdov povyshennoy massy i dliny [Traction calculation for trains with increased mass and length] / V. A. Kukushkin, D. L. Khudoyarov : progr. dlya EVM 2016618572 Ros. Federatsiya. № 2016615969 ; zayavl. 08.06.16 ; zareg. 02.08.16 ; opubl. 20.08.16.
5. Begagoin E. I., Khudoyarov D. L., Kukushkin V. A. Sravnitel'nyy analiz tyagovykh svoystv gruzovykh elektrovovozov VL11, 2ES6, 2ES10 [Comparative analysis of traction characteristics of freight locomotives VL11, 2ES6, 2ES10] // Transport Urala. 2016. № 2 (49). S. 105–109. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-105-109. ISSN 1815-9400.
6. Pervaya Lokomotivnaya Kompaniya [First Locomotive Company]. [Site]. URL: <http://1-plk.com/> (access date: 15.04.2017).

УДК 629.113: 623.437.093

Игорь Александрович Тараторкин, доктор технических наук, заведующий отделом механики транспортных машин Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург, профессор кафедры «Гусеничные машины и прикладная механика» Курганского государственного университета, Курган, Россия,

Виктор Борисович Держанский, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург, заведующий кафедрой «Гусеничные машины и прикладная механика» Курганского государственного университета, Курган, Россия,

Александр Игоревич Тараторкин, кандидат технических наук, научный сотрудник Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Курганского государственного университета, Курган, Россия,

Александр Александрович Волков, программист Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург, аспирант кафедры «Гусеничные машины и прикладная механика» Курганского государственного университета, Курган, Россия

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТНЫХ КАЧЕСТВ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН, ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ С ДИСКРЕТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Igor Alexandrovich Taratorkin, DSc in Engineering, Head of Mechanics of Vehicles Department, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), Ekaterinburg, Professor, Caterpillar Machinery and Applied Mechanics Department, Kurgan State University, Kurgan, Russia,

Viktor Borisovich Derzhanskiy, DSc in Engineering, Lead Researcher, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), Ekaterinburg, Head of Caterpillar Machinery and Applied Mechanics Department, Kurgan State University, Kurgan, Russia,

Alexander Igorevich Taratorkin, PhD in Engineering, Researcher, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), Ekaterinburg, Russia, Researcher, Research Department, Kurgan State University, Kurgan, Russia,

Alexander Alexandrovich Volkov, Programmer, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), Ekaterinburg, postgraduate student, Caterpillar Machinery and Applied Mechanics Department, Kurgan State University, Kurgan, Russia

Increasing the degree of realization of the potential of high-speed properties of tracked vehicles with discrete properties by turning the control system

Аннотация

В статье приведены результаты исследования динамики управляемого движения гусеничных машин, оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами. Установлено, что потенциальная быстроходность ограничивается неустойчивостью движения и динамическими свойствами — фазовым отставанием реакции машины на гармоническое управляющее воздействие и забросом реакции на единичную функцию («рывок штурвала»).

Обоснованы технические предложения, способствующие повышению быстроходности машины, такие как управление поворачивающим моментом, из условия обеспечения положительной разности частных производных по кривизне от поворачивающего момента и момента сопротивления повороту; повышение жесткости динамической системы для увеличения собственной частоты и снижения энергии при возбуждении колебательных процессов; использование shaper-алгоритмов управления тормозом поворота.

Ключевые слова: дискретные свойства, система управления поворотом, быстроходность, устойчивость, динамические свойства, фазовое отставание, переходная функция.

Summary

The article presents the results of a study of the dynamics of controlled motion tracked vehicles equipped with rotating control system with discrete properties. It was found that the potential rapidity of motion is limited by instability and dynamic properties — a lag phase of the reaction machine to harmonic control action and «reflex reaction» on a single function (the wheel wrench). Sound technical proposals, providing increasing rapidity of the machine, such as control-turning point, providing a positive difference of partial resistance and turning points turn on the curvature; increase the rigidity of the dynamic system to increase the natural frequency and reduce the energy in the excitation of vibrational processes; shaper implementation of the rotation brake control algorithms.

Keywords: discrete properties, the control system turning, high-speed properties, stability and dynamic properties, the phase lag, transfer function.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-49-55

ВВЕДЕНИЕ

К числу основных эксплуатационных свойств транспортных гусеничных машин относится быстроходность, оцениваемая скоростными качествами. Повышение удельной мощности до 25 кВт/т, совершенствование трансмиссий, систем управления движением и систем информационного обеспечения способствует росту потенциальных скоростных свойств гусеничных машин. Однако реализация таких свойств ограничивается рядом динамических явлений, характеризующих управляемость при прямолинейном движении и в процессе поворота, особенно при роботизации машины (дистанционном или программном управлении). Большинство современных машин оснащены системой управления поворотом (СУП) с непрерывными свойствами, которые обеспечиваются гидрообъемными передачами (ГОП). Основной недостаток таких систем состоит в том, что для достижения высоких динамических качеств управления поворотом необходимы высокая установочная мощность ГОП и дополнительный объем в корпусе машины для размещения гидростанции и радиатора охлаждения.

При существенных ограничениях по условиям компоновки и объемно-массовым параметрам установочная мощность ГОП системы управления поворотом лимитирована. В связи с этим в систему управления поворотом отечественных и зарубежных машин вводится ряд конструктивных решений по созданию многопоточных приводов, обеспечивающих повышение динамических свойств и управляемости [1].

Кроме того, при ограничении скоростного режима работы двигателя при движении в тяжелых условиях, а также при интуитивном ошибочном снижении водителем подачи топлива по условиям безопасности в повороте происходит разблокировка гидротрансформатора. При этом возрастает чувствительность к управляющему воздействию, что вызывает закручивание траектории в спираль. Соответствующее увеличение кривизны траектории сопровождается ростом мощности сопротивления повороту, перегрузкой двигателя, его заглоханием и остановкой машины.

Суровые условия эксплуатации машин, низкие возможности организации сервисного обслуживания, недостаточная надежность электронных устройств и гидрообъемных передач, ограничения по стоимости приводят к необходимости создания более простых систем управления поворотом, имеющих преимущества по весовым и объемным показателям, степени технологического совершенства элементов конструкции и др. Такие системы управления обладают дискретными свойствами, и ими оснащены многие ранее разработанные машины, а также современная перспективная транспортная машина ТМ-140, предназначенная для суровых условий эксплуатации Арктики [2].

Сравнительные испытания гусеничных машин с различными системами управления поворотом показали (рис. 1) [1, 3], что при удельной мощности до 20 кВт/т в характерных условиях движения (деформируемый грунт) средняя скорость машин, оснащенных СУП с дискретными свойствами (график 1 на рис. 1), не ниже, чем у машин с непрерывными (график 3 на рис. 1) свойствами. При движении по дорогам с малодеформируемым основанием (асфальт, бетон, мерзлый грунт), с низкими сцепными свойствами и интенсивным изменением

кривизны на тестовых трассах «змейка», «переставка» и «затяжной поворот» скоростные качества машин, оснащенных СУП с дискретными свойствами, ограничены и не превышают 36–38 км/ч (график 2 на рис. 1), что объясняется невозможностью плавного регулирования кривизны траектории, углового ускорения, компенсации отклонения траектории. При этом увеличивается интенсивность управляющей деятельности водителя, число включений СУП (подруливаний) на километр пути возрастает в 6–9 раз, достигая 96, т.е. предельной по психологическим возможностям водителя величины. Соответственно компенсирующее управление водителя эффективно при скорости менее 36–38 км/ч, а при дистанционном управлении роботизированными комплексами на базе этих машин средняя скорость движения не превышает 5 км/ч. Это определяет актуальность повышения быстроходности гусеничных машин, оснащенных СУП с дискретными свойствами.

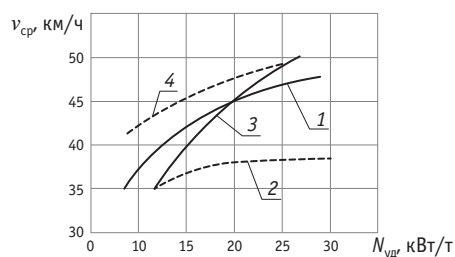


Рис. 1. Зависимость средней скорости движения от удельной мощности машины с различными системами управления поворотом: 1, 2 — с дискретными свойствами; 3, 4 — с непрерывными свойствами; — деформируемый грунт; ---- бетонное покрытие

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научно обосновать способы повышения реализации потенциальных скоростных качеств гусеничных машин, оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ БЫСТРОХОДНОСТЬ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН, И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Обоснование строится на основе анализа результатов исследования динамики управляемого движения, которое осуществляется в соответствии с математической моделью, имеющей физический смысл при выполнении условий устойчивости. При неустойчивом движении возмущения, в том числе случайные, приводят к существенным и быстрым отклонениям параметров траектории движения, которые водитель обнаруживает с запаздыванием. Затем следует запаздывание в создании управляющего воздействия, и только после этого корректируются параметры траектории. При движении с большой скоростью устойчивость снижается вследствие действия центробежной силы в процессе поворота.

Условия статической устойчивости принято определять неравенством производных моментов — поворачивающего момента M_n и момента сопротивления повороту M_c по кривизне $k = \frac{\phi}{v}$, т.е. $\frac{\partial M_c}{\partial k} > \frac{\partial M_n}{\partial k}$. Момент сопротивления повороту рассчитывается как

$$M_c = \frac{\dot{\phi}}{v} \sum_{i=1}^n C_{y_i} (l_i - \chi)^2,$$

где $\dot{\phi}$ — угловая скорость поворота, рад/с;

v — линейная скорость движения, м/с;

C_{y_i} — коэффициент сопротивления боковому уходу опорных катков, число которых n , Н/рад;

l_i — продольная координата i -й пары опорных катков, м;

χ — продольное смещение полюса поворота, м, которое определяется по выражению [4]

$$\chi = \frac{v^2 L k}{2 \mu g},$$

где L — длина опорной поверхности машины, м;

μ — коэффициент сопротивления повороту грунта;

g — гравитационное ускорение, равно $9,81 \text{ м/с}^2$.

Момент сопротивления повороту M_c является переменной величиной и зависит от кривизны k и квадрата скорости движения v . При больших значениях скорости v с ростом кривизны траектории M_c возрастает до определенного значения, а дальнейшее увеличение кривизны сопровождается уменьшением M_c (график 1 на рис. 2). Поворачивающий момент $M_{\text{пр}}$, создаваемый двигателем и механизмом поворота с дискретными свойствами, не зависит от кривизны траектории движения (график 2 на рис. 2). В области роста момента сопротивления

производная положительна $\frac{\partial M_c}{\partial k} > 0$, а в области уменьшения

отрицательна. Учитывая, что $\frac{\partial M_{\text{пр}}}{\partial k} = 0$, разность производных

(график 3 на рис. 2) в первой области положительна (движение устойчивое), а во второй отрицательна (движение неустойчивое). Аналогично можно определить границу устойчивости при вариации скорости движения $v_4 > v_3 > v_2 > v_1$, построить зависимость предельной по устойчивости скорости движения v от кривизны траектории k (график 4 на рис. 2). Предельная

по боковому заносу скорость движения $v < \sqrt{\frac{\mu g}{k}}$ характеризу-

ется графиком 5 на рис. 2. Она определяется нулевым значением момента сопротивления повороту или продольным смещением полюса поворота, достигающим значения $\chi = 0,5L$.

Результаты экспериментального исследования динамики управляемого движения по деформируемому грунту с использованием высокоточной аппаратуры [4] показывают, что продольное смещение центра поворота на величину χ приводит к боковому движению. При этом между продольной осью машины и касательной к требуемой траектории образуется угол ухода θ (направляющий угол). Когда величина χ достигает значения $0,5L$, движение остается управляемым, а поворачивающий момент $M_{\text{пр}}$ вопреки общепринятым представлениям, не равен нулю. Это вызвано боковым движением, увели-

вающим момент сопротивления на величину $\theta \cdot \sum_{i=1}^n C_{y_i} (l_i - \chi)$

(заштрихованная область a на графике 1, рис. 2). Данное обстоятельство позволяет расширить области управляемого и устойчивого движения (заштрихованные области b и c на графиках 4 и 5, рис. 2).

При движении по твердому грунту с низкими сцепными свойствами повышение составляющей момента M_c , формируемой боковым движением, незначительно. В таких условиях устойчивость может быть достигнута соответствующим регулированием энергосилового блока (частоты вращения турбины путем разблокировки гидротрансформатора и перевода двигателя на регуляторную ветвь). Это обеспечивает создание функции силы тяги P_2 на гусенице забегающего борта из условия обеспечения устойчивости. При выполнении механизма управления тормозом поворота в виде передачи «шарик — лунка», управляемой электродвигателем, представляется возможным регулировать силу P_1 из условия обеспечения требуемой зависимости $\frac{\partial M_{\text{пр}}}{\partial k} = 0,5B \frac{\partial (P_2 - P_1)}{\partial k} < \frac{\partial M_c}{\partial k}$ (линия b на рис. 2).

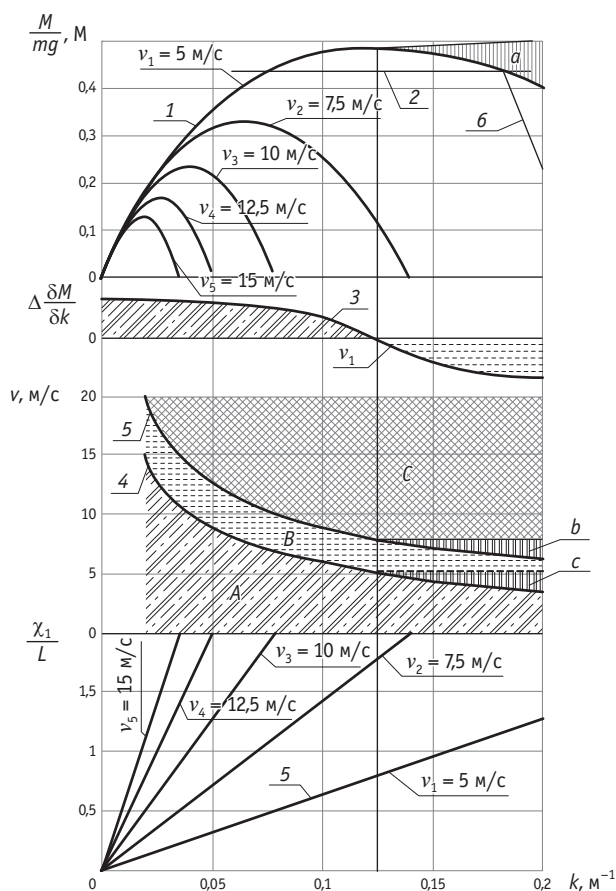


Рис. 2. Оценка статической устойчивости движения гусеничной машины в повороте:

A — зона устойчивого движения; B — зона неустойчивого движения; C — область ограничения скорости движения по боковому заносу; a — увеличение предельно допустимой скорости движения машины при действии боковой силы; b — зона расширения области движения без бокового заноса при действии боковой силы; c — зона расширения области устойчивости движения

Фактором ограничения быстроходности, как показывает анализ результатов экспериментального исследования динамики управляемого движения [1] и опыт эксплуатации машин при движении по дорогам с интенсивным изменением кривизны траектории, является фазовое отставание реакции на управляющее воздействие (рис. 3). Это проявляется в том, что продольная ось корпуса не успевает повернуться относительно касательной требуемой траектории. Для вписывания в заданный коридор необходимо снижать скорость движения.

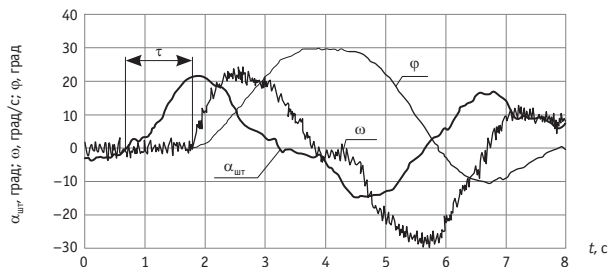


Рис. 3. Фрагмент осциллограммы с записью изменения кинематических параметров при движении по змейке (деформируемый грунт, длина полуволны $\Delta S = 30$ м, IV передача):
 $\alpha_{шт}$ — угол поворота штурвала; ω — угловая скорость;
 φ — курсовой угол; τ — время запаздывания реакции машины по угловой скорости

Обоснование возможности повышения скоростных свойств гусеничной машины сокращением фазового отставания реакции на гармоническое управляющее воздействие приводится ниже. Зависимость фазовой характеристики от частоты вращения представлена на рис. 4. С увеличением частоты от 0 до собственного значения ω_0 значение фазового угла возрастает от 0 до $0,5\pi$. При дальнейшем увеличении частоты значение фазового угла интенсивно возрастает до π .

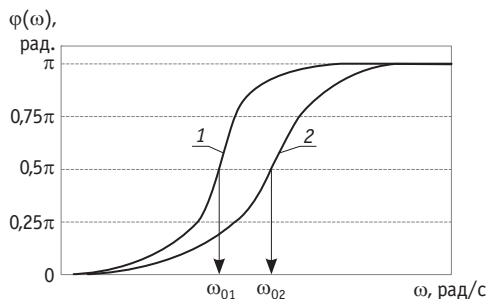


Рис. 4. Эффективность повышения жесткости трактов гусениц:
1 — фазовая частотная характеристика машины с серийной гусеницей;
2 — то же с гусеницей повышенной линейной жесткости

Частота процесса зависит от интенсивности управляющих действий водителя:

$$\omega = \begin{cases} \frac{\pi v}{\Delta S} \\ 2\pi N^* \cdot v \end{cases}$$

Первая строка определяет частоту процесса при движении по тестовой змейке с длиной полуволны ΔS , а вторая — при движении по дороге со случайным характером изменения кривизны. N^* — математическое ожидание случайной функции удельного числа включения системы управления поворотом машины:

$$N^* = \int_0^{k_{\Phi}} \frac{k_d}{\beta(k_d)} \varphi_s(k_d) dk_d,$$

где $\varphi_s(k_d)$ — плотность вероятностей модуля дорожной кривизны $k_d = |k_d|$ при $0 \leq k_d \leq k_{\Phi}$, определяемая по спектральной плотности или корреляционной функции дорожной кривизны $k_d = |k_d|$;

$\beta(k_d)$ — зависимость угла поворота машины от дорожной кривизны. В конкретных условиях движения цикличность включения системы управления поворотом наиболее точно определяется по экспериментальным данным [4].

Собственная частота системы определяется по уравнению

$$\omega_0^2 = \frac{C_m}{J_{пр}} \quad (C_m \text{ — механическая жесткость системы; } J_{пр} \text{ —}$$

приведенный момент инерции машины относительно вертикальной оси). Таким образом, для увеличения скорости движения необходимо, чтобы значение собственной частоты находилось за пределами диапазона, определяемого возможностями водителя в процессе управления машиной, движущейся с большой скоростью. Анализ показывает, что для машин, оснащенных гусеницами с резинометаллическим шарниром (РМШ), этого можно достичь повышением линейной жесткости шарниров, в частности, за счет использования конструкции РМШ со сплошным основанием резинового элемента. По сравнению с цилиндрическими кольцами это существенно повышает собственную частоту системы, а следовательно, и предельное значение по управляемости частоты $\omega = 0,75\pi$ на 64 % (см. график 2 на рис. 4). Предлагаемое повышение линейной жесткости гусеницы обеспечивает увеличение скорости движения машины по тестовой змейке на 12–16 %. Кроме того, данное решение позволяет увеличить усталостную долговечность РМШ гусениц в 2,9 раза (результаты стендовых испытаний).

Фазовое отставание реакции можно сократить, если водитель будет изменять управляющее воздействие по производной рассогласования направляющего угла θ . Это может быть осуществлено с помощью автоматизированной системы управления движением. При достаточном значении поворачивающего момента представляется возможным сократить фазовое отставание реакции введением в систему управления форсирующего звена. При последовательном включении форсирующего звена реакция на гармоническое возмущение на выходе дифференцирующего устройства также будет гармонической, но с опережающей фазой φ_K [5]:

$$\omega_K(t) = \omega_K \sin(\omega t + \varphi_K),$$

где ω_K — амплитуда реакции, $\omega_K = k_K z \omega / \cos(\varphi_K)$;
 z — амплитуда гармонического возмущения;

φ_K — фаза, $\varphi_K = \arctg(T_d \omega)$;

T_d — постоянная времени дифференцирующего звена.

Выбором значения постоянной T_d можно обеспечить необходимое упреждение сигнала поворачивающего момента, действующего на вход электронного блока канала управления тормозом поворота. Последнее позволяет осуществлять регулирование поворота по сигналу обратной связи АСУ.

Степень реализации потенциальных скоростных качеств гусеничной машины определяется также динамическими свойствами при входе в поворот (реакцией на «рывок штурвала»). При этом поворачивающий момент определяется выражением

$$M_n = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq \tau \\ 0,25 \cdot \mu \cdot mg \cdot L & \text{при } t > \tau, \end{cases}$$

где τ — время смещения управляющей функции относительно управляющего воздействия (см. рис. 3).

Величина смещения определяется характеристикой нелинейности системы управления m и длительностью вытяжки провисающей на поддерживающих катках ветви гусеницы отстающего борта.

Для гусеничной машины с параметрами $m = 11556$ кг, $L = 4$ м, $C_y = 60$ кН/рад, $J_z = 48200$ кгм² переходная функция $H(t)$ в виде реакции на ступенчатую функцию представлена на рис. 5. Из приведенных данных следует, что эта функция существенно зависит от скорости движения. При $v < 10$ м/с переходный процесс является аperiодическим (график 1 на рис. 5). При больших значениях скорости ($v = 10$ м/с, график 2, и $v = 15$ м/с, график 3 на рис. 5) переходный процесс является периодической функцией с частотой β и затухающими колебаниями во времени по экспоненциальному закону $\phi = \lambda e^{-\alpha t} \sin(\beta(t - \tau) + \Psi)$. Интенсивность затухания определяется демпфирующими свойствами грунта. При уменьшении μ от 0,8 до 0,4 длительность переходного процесса возрастает в 1,5–2 раза. Кроме того, при движении на твердых грунтах ($\mu = 0,4$) существенно возрастает заброс реакции до 50 %, что также требует ограничения скорости движения.

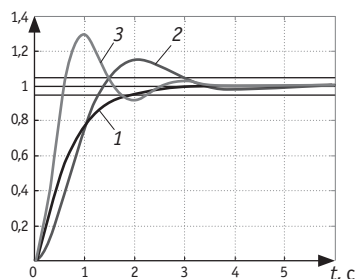


Рис. 5. Переходная функция — реакция гусеничной машины на единичное управляющее воздействие («рывок штурвала»)

Следует отметить, что результаты экспериментального определения переходных характеристик отличаются большими значениями амплитуд колебаний относительно установившегося значения, что связано с расчетом по модели, в которой не учитывается упругость элементов. Для повышения сходи-

мости результатов в дифференциальные уравнения вращательного движения вводится приведенная жесткость $C_{пр}$. Величину $C_{пр}$ можно рассматривать как композицию составляющих — деформации соединительных валов, рабочих ветвей гусениц, элементов блока подвески опорных катков. При повороте гусеничной машины функция приведенной жесткости является существенно нелинейной и асимметричной, что может возбуждать параметрические колебания. Разработка способов гашения колебаний в нелинейной системе требует дополнительных исследований. В данной работе приведенная жесткость рассматривается как линеаризованная.

Для гусеничных машин со ступенчатым механизмом поворота, обеспечивающим дискретное регулирование направления движения, угловая скорость ω претерпевает разрыв второго рода, а ее производная $\dot{\omega}$ является дельта-функцией $\delta(t)$, т.е. по абсолютному значению она может изменяться в неограниченном интервале. Однако из экспериментальных данных следует, что в упруго-инерционной механической системе «двигатель — трансмиссия», включающей фрикционные элементы, взаимодействие гусеницы и грунта происходит с буксованием. При этом значения производной $\dot{\omega}$ изменяются непрерывно в конечных, хотя и значительных пределах. Даже при ограниченном отклонении угловой скорости до 5 град/с с частотой 2,5 Гц (вследствие увода и колебательных процессов в силовом блоке) угловые ускорения достигают 32 град/с², а при циклическом включении механизма на затяжных поворотах — 74 град/с². Эти величины значительно превышают угловые ускорения при повороте гусеничной машины с дифференциальным гидрообъемным механизмом поворота (ГОМП), поворачивающий момент которого создается гидромотором. Поэтому при движении на деформируемых грунтах скоростные качества машин, оснащенных СУП с дискретными свойствами, могут быть выше, чем у машин с ГОМП. При этом реализация высоких значений боковых ускорений (до 10–11 м/с²) не сопровождается заносом, так как после нескольких заездов образуются колея глубиной до 60–80 мм. Однако при движении на малодеформируемых грунтах эти возможности не удается реализовать из-за ограничения сцепных свойств.

Из приведенных результатов следует, что дискретные свойства системы управления поворотом ограничивают быстроходность машин из-за колебательности переходных процессов и существенного заброса реакции при входе в поворот. В технике эти явления принято характеризовать эффектом «Бонанца» (Bonanza effect) [6–9], который наблюдается при управлении механическими системами транспортных машин. В общем случае возникающие колебания ограничивают быстроходность машин, воспринимаются водителем как тревожные, увеличивают нагрузку на элементы конструкции и ухудшают уровень комфортабельности. Амплитуды этих колебаний необходимо сократить отстройкой по частоте, т.е. максимальные амплитуды будут сдвинуты на частотах, которые не являются критическими для данной машины. Кинетическая энергия колебательного процесса зависит от квадрата момента M и обратно пропорциональна удвоенному значению жесткости двигателя C . Увеличение жесткости рассматриваемой системы вызывает снижение кинетической энергии колебаний из-за создаваемого

системой управления поворотом импульса крутящего момента. При прочих равных условиях это приводит к более высокой эффективности демпфирования.

При неизменных конструктивных параметрах машины импульс, который вызывает колебания при приложении крутящего момента, может быть изменен, чтобы предотвратить или снизить образование свободных колебаний. Процедуру можно пояснить с помощью практического примера, описанного в [6].

Представляется, что наиболее эффективным способом ограничения колебаний является синтез и введение в блок управления электродвигателя тормоза поворота sharper-формирователя [10, 11]. Основная идея таких формирователей заключается в создании управляющего сигнала путем свертки задающего управляющего воздействия с последовательностью импульсов в виде дельта-функции Дирака. Реакция системы 2-го порядка на импульсное задающее воздействие определяется уравнением

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0(t-t_0)} \right] \sin\left(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}(t-t_0)\right),$$

где A — амплитуда импульса;

ω_0 — собственная частота;

ξ — коэффициент демпфирования;

t и t_0 — длина импульсов и частота их следования.

Коэффициенты наиболее эффективного формирователя (ZV-shaper, т.е. нулевой вибрации, от англ. zero vibration) рассчитывались в соответствии с выражениями:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & 0,5T \end{bmatrix}; K = \exp\left(\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right); T = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}},$$

где A_i — амплитуда i -го импульса;

t_i — время i -го импульса;

ω — частота колебаний;

ξ — коэффициент демпфирования.

Анализ использования различных регуляторов показал, что наилучшие результаты демонстрируют ZV-фильтры, которые позволяют минимизировать предельное перерегулирование до 5%, а переходный процесс становится близким к апериодическому, в том числе при движении с большой скоростью на грунтах с низкими сцепными свойствами.

ОГРАНИЧЕНИЯ

Исследования выполнены на основе анализа линейной системы. Актуальной задачей на будущее является уточнение моделей динамики управляемого движения гусеничных машин при нелинейности упругой характеристики гусеничного движителя и при условии возбуждения волновых процессов в упругой гусенице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования и экспериментального исследования динамики управляемого движения гусеничной машины, оснащенной СУП с дискретными свойствами, установлено, что степень реализации потенциальных скоростных качеств ограничивается следующими динамическими свойствами машины: статической устойчивостью движения машины в повороте и боковым заносом;

фазовым отставанием реакции машины на гармоническое управляющее воздействие;

качеством реакции на «рывок штурвала» (на единичное управляющее воздействие).

Для увеличения быстроходности машин обоснованы пути повышения устойчивости движения за счет обеспечения положительной разности частных производных по кривизне траектории момента сопротивления и поворачивающего момента,

т.е. $\frac{\partial M_c}{\partial k} > \frac{\partial M_n}{\partial k}$. Это может быть достигнуто работой двига-

теля на регуляторной ветви, что обеспечивается разблокировкой гидротрансформатора и управляемым буксованием дисков тормоза поворота. Область устойчивости движения можно расширить при боковом движении машины путем дополнительной составляющей момента сопротивления повороту.

Действие ограничения быстроходности машины на дорогах с интенсивным изменением кривизны, определяемого фазовым отставанием реакции машины на управляющее воздействие, предлагается сократить за счет повышения линейной жесткости резинометаллических шарниров гусеницы и введения в систему управления дифференцирующего устройства.

На дорогах с ограниченными сцепными свойствами скоростные качества могут быть повышены за счет введения в блок управления тормозом поворота ZV-shaper-фильтра, обеспечивающего предотвращение возбуждения колебаний, при этом заброс реакции не превышает 5%.

Литература

1. Держанский В. Б., Тараторкин И. А. Прогнозирование динамической нагруженности гидромеханических трансмиссий транспортных машин. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2010.
2. Проект Концепции устойчивого развития Арктической зоны Российской Федерации / Минрегион России. М., 2005.
3. Тараторкин И. А. Разработка расчетных и экспериментальных методов снижения динамической нагруженности и повышения долговечности гидромеханических трансмиссий транспортных машин : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГТУ им Н.Э. Баумана, 2009.

References

1. Derzhanskiy V. B., Taratorkin I. A. Prognozirovaniye dinamicheskoy nagruzhennosti gidromekhanicheskikh transmissiy transportnykh mashin [Predicting dynamic loading of hydro-mechanical transmissions of transport vehicles]. Ekaterinburg : Izd-vo UrO RAN, 2010.
2. Proekt Kontseptsii ustoychivogo razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Draft Concept of sustainable development of the Arctic Zone of the Russian Federation] / Minregion Rossii. M., 2005.
3. Taratorkin I. A. Razrabotka raschetnykh i eksperimental'nykh metodov snizheniya dinamicheskoy nagruzhennosti i povysheniya dolgovechnosti gidromekhanicheskikh transmissiy transportnykh mashin : dis. ... d-ra

4. Экспериментальное определение кинематических и силовых параметров при повороте гусеничной машины / И. А. Тараторкин, В. Б. Держанский, М. В. Вязников и др. // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 80–86. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-80-86. ISSN 1815-9400.
 5. Гуревич А. П., Корнев В. В., Хромов А. П. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2016. 464 с.
 6. The Automotive Transmission Book / R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens, et al. Springer International Publishing, 2015.
 7. Jürgens G., Fischer R. Vergleich verschiedener Systeme zur Verringerung von Triebstrangschwingungen // Abkoppeln von Drehschwingungen bei Kfz- und Industriegetrieben. 1988. Vol. 697.
 8. Schopf H.-J., Jürgens G., Fischer R. Optimierung der Komforteigenschaften des Triebstrangs von Mercedes-Benz Fahrzeugen mit Schaltgetriebe. ATZ 91, 1989. S. 568–575.
 9. Sorensen K. L. Operational performance enhancement of human operated flexible systems. Georgia Institute of Technology, 2008.
 10. Sorensen K. L., Singhose W. E., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes // Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15. № 7. P. 825–837.
 11. Интеллектуальные алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами / А. П. Кузнецов, А. В. Марков, М. К. Хаджинов и др. // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : матер. междунар. науч.-техн. конф. Минск : БГУИР, 2011. С. 493–504.
4. Eksperimental'noe opredelenie kinematicheskikh i silovykh parametrov pri povorote gusenichnoy mashiny [Experimental determination of kinematic and power parameters when turning of tracked vehicle] / I. A. Taratorkin, V. B. Derzhanskiy, M. V. Vyaznikov i dr. // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 80–86. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-80-86. ISSN 1815-9400.
 5. Gurevich A. P., Kornev V. V., Khromov A. P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s resheniyami v MATLAB : ucheb. posobie [Theory of automatic control in examples and problems with solutions in MATLAB : textbook]. SPb. : Lan', 2016. 464 s.
 6. The Automotive Transmission Book / R. Fischer, F. Küçükay, G. Jürgens, et al. Springer International Publishing, 2015.
 7. Jürgens G., Fischer R. Vergleich verschiedener Systeme zur Verringerung von Triebstrangschwingungen // Abkoppeln von Drehschwingungen bei Kfz- und Industriegetrieben. 1988. Vol. 697.
 8. Schopf H.-J., Jürgens G., Fischer R. Optimierung der Komforteigenschaften des Triebstrangs von Mercedes-Benz Fahrzeugen mit Schaltgetriebe. ATZ 91, 1989. S. 568–575.
 9. Sorensen K. L. Operational performance enhancement of human operated flexible systems. Georgia Institute of Technology, 2008.
 10. Sorensen K. L., Singhose W. E., Dickerson S. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes // Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15. № 7. P. 825–837.
 11. Intellektual'nye algoritmy upravleniya pod'emno-transportnymi mekhanizmami [Intelligent algorithms for controlling hoisting and transport mechanisms] / A. P. Kuznetsov, A. V. Markov, M. K. Khadzhinov i dr. // Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh sistem : mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk : BGUIR, 2011. S. 493–504.

УДК 629.4.015: 612.752: 621.534

Сергей Викторович Елисеев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник — директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Алексей Иванович Орленко, кандидат технических наук, директор Красноярского института железнодорожного транспорта — филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (КриЖТ ИрГУПС), Красноярск, Россия,

Андрей Владимирович Елисеев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

СТРУКТУРНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: ДИАДЫ, ИХ СВОЙСТВА, ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Sergey Viktorovich Eliseev, DSc in Engineering, Professor, Chief Researcher — Director of the Scientific and Educational Center for Advanced Technologies, Systems Analysis and Modeling, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia,

Alexey Ivanovich Orlenko, PhD in Engineering, Director of Krasnoyarsk Institute of Railway Transport — a branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, Russia,

Andrey Vladimirovich Eliseev, PhD in Engineering, Senior Researcher, Scientific and Educational Center for Advanced Technologies, Systems Analysis and Modeling, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Dyad as the system-forming basis of dynamic properties of vibrating structures

Аннотация

Рассматриваются динамические свойства структурных образований в составе механических колебательных систем с сосредоточенными параметрами. Диада определяется как два инерционно-пружинных элемента с пружиной, обеспечивающей прямолинейные колебательные движения. Предполагается, что диада изолирована от внешних сил, приложенных к ее инерционным элементам.

Цель исследования заключается в разработке методологических подходов к оценке фундаментальных свойств диады как возможной начальной формы построения более сложных структур.

Используется метод структурного математического моделирования, в рамках которого на основе принципов динамических аналогий сопоставляется структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления.

Предлагаются передаточные функции диады, в том числе передаточные функции межпарциальных связей. Показаны возможности использования частотных методов теории автоматического управления. Выявлены динамические эффекты взаимодействия элементов диады при условии совместного действия возмущений. Рассмотрены возможности управления динамическими состояниями диады в таких проявлениях, как режимы динамического гашения колебаний. Дана оценка возможностей реализации совместных движений по двум координатам, в том числе при учете функциональной связи между внешними силами. Получены аналитические соотношения для определения частот динамических эффектов. Приведены примеры особенностей амплитудно-частотных характеристик. Разработана технология построения частотных диаграмм для интегральной оценки динамических свойств диады. Результаты исследований представляют интерес для специалистов в области прикладной механики, теории механизмов и машин, динамики транспортных машин и их агрегатов, в том числе подвесок тяговых двигателей, и защиты оборудования и аппаратуры от вибрационных возмущений.

Ключевые слова: диада, передаточные функции, межпарциальные связи, динамическое гашение колебаний, связность движений.

Summary

The dynamic properties of structures consisting of mechanical oscillation systems with lumped parameters are discussed. Two inertial-mass elements with a spring which provides a rectilinear oscillatory motion are defined as dyad. It is supposed that a dyad is isolated from external contact, and the movement is realized by the action of the harmonic external forces applied to mass-inertial elements of the dyad.

The purpose of this research is to develop methodological positions which allow to estimate the fundamental properties of the dyad, as a possible initial form for building more complex structures.

The method of structural mathematical modeling is used. The structural scheme equivalent in the dynamic relation of the automatic control system is mapped on principles of dynamical analogies in the present approach.

Transfer functions of dyads, including transfer functions interpartial ties are offered. The possibility of using the frequency methods of the theory of automatic control are shown. Dynamic effects of interaction between the elements of the dyad, subject to the joint action of the perturbation are identified. The possibilities of control of dynamic states in the dyad in such manifestations as the dynamical damping of oscillations are shown. Opportunities for joint movements along two coordinates, including considering functional relations between external forces, are assessed. The analytical relations for determination of the frequencies of dynamic effects are obtained. Features of the amplitude-frequency characteristics are illustrated on examples. The technology of constructing frequency diagrams for the integral evaluation of the dynamic properties of the dyad is developed. The research results are of interest for specialists in applied mechanics, theory of mechanisms and machines, robotics and mechatronics.

Keywords: dyad, transfer functions, interpartial ties, dynamic oscillation, connectivity of motion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-56-63

ВВЕДЕНИЕ

Механические колебательные системы с одной и более степенями свободы с сосредоточенными параметрами часто применяются в качестве расчетных схем различных технических объектов, в том числе вибрационных машин [1–3], оборудования, работающего в условиях интенсивного динамического нагружения [4, 5], транспортных средств [6, 7]. Вместе с тем ряд проблем не получил детализированного развития в направлении структурного математического моделирования, использующего подходы и аналитический аппарат системного анализа и теории управления. В этом плане в динамике подвижного состава железнодорожного транспорта должна учитываться специфика динамического взаимодействия элементов систем, в составе которых используются различные дополнительные связи, рычажные механизмы и устройства для преобразования движения, характерные для систем рессорного подвижного экипажа и колесно-моторного блока в частности [7, 8–11]. Повышенный интерес проявляется к вопросам расширения состава элементарных типовых звеньев, введения в структуру систем дополнительных связей и механизмов [12–16], что инициирует поиск и разработку способов и средств оценки, контроля и управления динамическим состоянием механических колебательных систем с развитой структурой. Определенные перспективы приобрели исследования, опирающиеся на теорию цепей, а также на теорию автоматического управления [4, 11, 17].

В настоящей работе развивается методологическая основа подхода к изучению специфики проявления динамических свойств механических колебательных систем через исследование особенностей взаимодействия элементов диад. Выделяемые в составе колебательных систем диады являются структурами, которые можно определить как исходные ячейки для построения более сложных образований. Диада в простейшем виде, если рассматривать возможности прямолинейных горизонтальных колебаний, представляет собой два инерционных элемента, связанных между собой упругим звеном при полной изоляции от контактов с другими элементами системы.

1. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассматривается механическая колебательная система цепного типа с двумя степенями свободы, которая состоит из двух инерционных элементов m_1 и m_2 (рис. 1а), соединенных между собой пружиной с жесткостью k_2 . Внешние силы являются гармоническими (Q_1, Q_2) и прикладываются непосредственно к элементам m_1 и m_2 (см. рис. 1а). Структурная математическая модель представлена на рис. 1б. Исходная структурная схема при действии одиночных внешних сил может быть преобразована в более простые формы, как это показано на рис. 1в, г.

При построении структурных математических моделей (см. рис. 1б–г) использованы приемы, изложенные в работах [5, 11, 12], что предполагает применение уравнения Лагранжа второго рода с последующими преобразованиями Лапласа при нулевых начальных условиях. На рис. 1б–г обозначено: $p = j\omega$ — комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$), значок \leftrightarrow над переменной соответствует изображению переменной по Лапласу.

Прямолинейное движение описывается в системе координат y_1 и y_2 . В дальнейшем рассматриваются не только совместные, но и одиночные действия силовых факторов Q_1 и Q_2 .

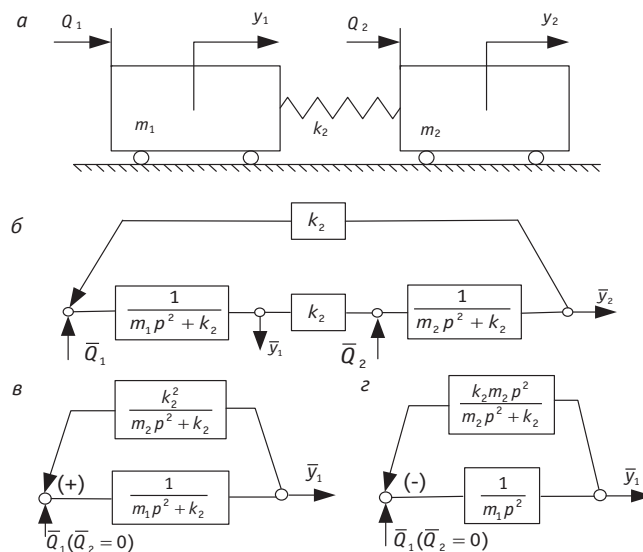


Рис. 1. Принципиальная схема диады и варианты структурных математических моделей:

а — принципиальная схема; б — структурная схема системы с двумя одновременными возмущениями \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 ; в — структурная математическая модель с исключением координаты \bar{y}_2 при $\bar{Q}_2 = 0$; г — преобразованная структурная математическая модель системы по рис. 1а с исключением координаты \bar{y}_2 при $\bar{Q}_2 = 0$

1. При совместном действии сил \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 предполагается, что внешние силы могут иметь функциональную зависимость, определяемую условием

$$\bar{Q}_2 = \alpha \bar{Q}_1, \quad (1)$$

где α — коэффициент связности двух внешних сил.

Если принять, что $\bar{Q}_1 = \bar{Q}$, $\bar{Q}_2 = \alpha \bar{Q}$, то с учетом принципа суперпозиции при гармонических внешних воздействиях можно записать:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{m_2 p^2 + k_2(1 + \alpha)}{A(p)}; \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{\alpha m_1 p^2 + k_2(1 + \alpha)}{A(p)}; \quad (3)$$

$$W_{21}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha m_1 p^2 + k_2(1 + \alpha)}{m_2 p^2 + k_2(1 + \alpha)}, \quad (4)$$

где

$$A(p) = (m_1 p^2 + k_2)(m_2 p^2 + k_2) - k_2^2. \quad (5)$$

Уравнение (5) — это частотное характеристическое уравнение диады.

2. Введение связи между внешними воздействиями не изменяет частоту собственных колебаний диады, определяемую выражением, в котором коэффициент связности сил α не представлен в явном виде, тогда

$$\omega_{\text{соб}}^2 = \frac{k_2(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}. \quad (6)$$

Парциальные частоты диады также не зависят от коэффициента связности α , что позволяет записать:

$$n_1^2 = \frac{k_2}{m_1}; \quad (7)$$

$$n_2^2 = \frac{k_2}{m_2}. \quad (8)$$

Идея исследования заключается в оценке динамических свойств диады как структурного образования с фундаментальными свойствами, предопределяющими возможности механической колебательной системы, возникающие при присоединении диады к опорным поверхностям или упругим фрагментам системы.

2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Отметим, что частоты динамического гашения колебаний, если такие динамические эффекты соотносить с «обнулением» числителей передаточных функций (2) и (3), будут отличаться от значений парциальных частот, определяемых выражениями (7) и (8). В данном случае получим:

$$n_{10}^2 = \frac{k_2(1 + \alpha)}{m_1}; \quad (9)$$

$$n_{20}^2 = \frac{k_2(1 + \alpha)}{\alpha m_2}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы с учетом особенностей передаточных функций (2) и (3). Примем во внимание, что при $\alpha = 0$:

$$W_1'(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q} = \frac{m_2 p^2 + k_2}{A(p)}; \quad (11)$$

$$W_2'(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q} = \frac{k_2}{A(p)}; \quad (12)$$

$$W_{21}'(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{k_2}{m_2 p^2 + k_2}, \quad (13)$$

где $W_{21}'(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$ — передаточная функция межпарциальных связей диады.

1. Характеристическое частотное уравнение системы (5) имеет свои особенности. В частности, это связано с тем, что первая частота собственных колебаний равна нулю, тогда как вторая определяется выражением (6). Именно этим объясняется специфичный вид АЧХ на рис. 2.

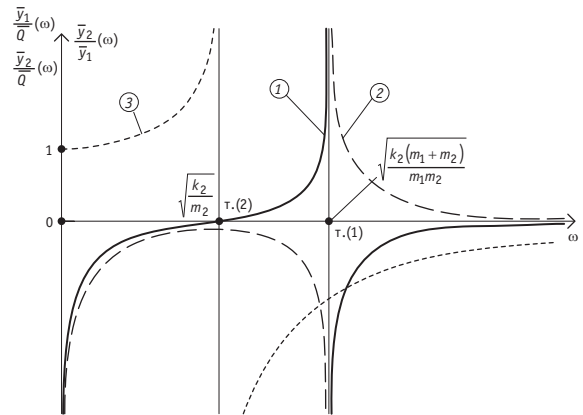


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики диады при $\alpha = 0$:
кривая 1 — $y_1(\omega)$; кривая 2 — $y_2(\omega)$; кривая 3 — $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$

2. Во всех рассматриваемых ситуациях предполагается, что диада совершает малые колебания относительно равновесного состояния. При $\alpha = 0$ на оси абсцисс можно выделить точку 1, которая соответствует резонансной частоте, и точку 2, определяющую частоту динамического гашения колебаний (см. рис. 2). При $\omega = 0$ графики $y_1(\omega)$ и $y_2(\omega)$ имеют разрыв, аналогичный ситуации при резонансе. Кривая 3 на рис. 2 отражает особенности связности движения между двумя координатами y_1 и y_2 . В частотном диапазоне 0 — точка 2, что соответствует частоте динамического гашения колебаний при $\alpha = 0$, возникает разрыв АЧХ, после прохождения которого массоинерционные элементы начинают двигаться в противоположных направлениях, а значение коэффициента связности колебаний y_2/y_1 становится отрицательным. При $\alpha = 0$ частота динамического гашения колебаний находится по выражению

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad (14)$$

т. е. совпадает с парциальной частотой n_2 , определяемой выражением (8). В плане оценки связности движений по координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2 можно отметить, что коэффициент y_2/y_1 отражает движения элементов диады в противофазе при приложении силы Q только к одному элементу m_1 .

3. При системе внешних сил, когда выполняется условие $\alpha = 1$, передаточные функции системы принимают вид:

$$W_1''(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q} = \frac{m_2 p^2 + 2k_2}{A(p)}; \quad (15)$$

$$W_2''(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q} = \frac{m_1 p^2 + 2k_2}{A(p)}; \quad (16)$$

$$W_{21}''(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{m_1 p^2 + 2k_2}{m_2 p^2 + 2k_2}. \quad (17)$$

Учет совместных действий внешних сил Q_1 и Q_2 через коэффициент связности внешних воздействий α показывает существенное изменение свойств диады. Если внешняя сила \bar{Q}_2 приводится к координате \bar{y}_1 , что физически объяснимо эквивалентным переносом внешнего воздействия \bar{Q}_2 к входу в парциальную систему $(m_1 p^2, k_1)$, где также приложена сила \bar{Q}_1 , то режим динамического гашения колебаний по координате \bar{y}_1 будет определяться через «обнуление» числителя передаточной функции (15):

$$\omega_{10\text{дин}}^2 = \frac{2k_2}{m_2}. \quad (18)$$

Выражение (18) уже не совпадает с выражением (14). В данном случае учет дополнительного силового воздействия реализуется через эффект увеличения жесткости упругого элемента в связке m_1, k_2, m_2 . Одновременно в системе появляется возможность реализации второго режима динамического гашения колебаний по координате \bar{y}_2 , при этом

$$\omega_{20\text{дин}}^2 = \frac{2k_2}{m_1}. \quad (19)$$

В таком случае режим динамического гашения колебаний также определяется через «обнуление» числителя передаточной функции (16). Частота динамического гашения колебаний ω_{20} не совпадает с парциальной частотой n_1 (парциальная система m_1, k_2). Что касается коэффициента связности движения $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$, то он принимает вид (17) и имеет на частоте ω_{20} нулевое значение, а при ω_{10} , определяемой из (17), претерпевает разрыв второго рода, что в целом характеризует существенные изменения в самоорганизации движений элементов диады.

4. На рис. 3 в качестве сравнения представлены АЧХ для тех же значений параметров ($k_2 = 2k, m_1 = m, m_2 = 2m$) при $\alpha = 1$. В данном случае проявляется специфический динамический режим, который можно было бы назвать «запирание» диады.

На частотной оси (см. рис. 3) характерными являются точка 1, соответствующая частоте собственных колебаний, и точка 2, которая соответствует режиму динамического гашения колебаний по координате \bar{y}_1 :

$$\omega_{10\text{дин}}^2 = \frac{2k_2}{m_2}, \quad (20)$$

что следует из «обнуления» числителя передаточной функции (15) при $\alpha = 1$.

В свою очередь, точка 3 соответствует частоте динамического гашения колебаний по координате \bar{y}_2 , при этом

$$\omega_{20\text{дин}}^2 = \frac{2k_2}{m_1}. \quad (21)$$

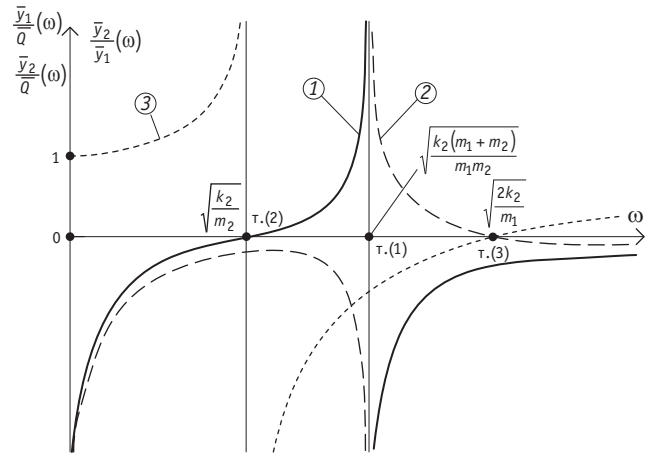


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики при одновременном действии двух внешних воздействий, приведенных к элементу m_1 , при $\alpha = 1$:

кривая 1 — $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; кривая 2 — $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$; кривая 3 — $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$

Кривая зависимости $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ при $\alpha = 1$ носит особый характер в связи с тем, что разрыв происходит в точке 1 до резонансной частоты. Что касается графика $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ в зарезонансной области, то он проходит через нулевое значение в точке 3, а затем принимает экстремальное значение в области положительных значений $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$. При увеличении ω график стремится к пределу, равному $1/2$, как показано на рис. 3 (кривая 3). Связность движений по координатам y_1 и y_2 характеризуется движением в фазе до частоты, определяемой точкой 3. При дальнейшем увеличении частоты совместное движение элементов диады происходит в противофазе.

5. При коэффициенте связности внешних сил $\alpha = -1$ получим:

$$W_1'''(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q} = \frac{m_2 p^2}{A(p)} = \frac{m_2}{m_1 m_2 p^2 + k_2(m_1 + m_2)}; \quad (22)$$

$$W_2'''(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q} = \frac{-m_1 p^2}{A(p)} = \frac{-m_1}{m_1 m_2 p^2 + k_2(m_1 + m_2)}; \quad (23)$$

$$W_{21}'''(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = -\frac{m_1}{m_2}. \quad (24)$$

На рис. 4 показаны АЧХ, имеющие те же параметры, что и АЧХ, представленные на рис. 2, при $\alpha = -1$.

В соответствии с (22) график $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$ будет иметь вид АЧХ системы с одной степенью свободы с частотой собственных колебаний, определяемой выражением (6). Аналогично график

зависимости $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ будет иметь идентичную характеристику, что предопределяет график зависимости $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ в виде прямой, параллельной оси абсцисс ω .

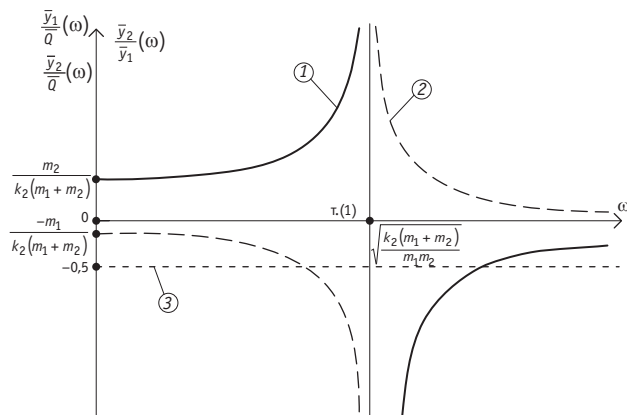


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики при одновременном действии двух внешних воздействий, приведенных к элементу m_1 , при $\alpha = -1$: кривая 1 — $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; кривая 2 — $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$; кривая 3 — $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$

В данном случае параметр отхода от оси абсцисс зависит от отношения $\frac{m_1}{m_2}$, что следует из (24). Отметим, что графики зависимостей $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ имеют разные знаки; при этом соблюдается условие

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega) = -\frac{m_1}{m_2}. \quad (25)$$

6. При $n_2^2 = \frac{k_2}{m_2}$ график зависимости $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ претерпевает разрыв второго рода, ординаты графика меняют знак на отрицательный. В диапазоне частот $0-n_2$ проявляются движения, соответствующие первой форме свободных колебаний; в точ-

ке с частотой n_2 происходит смена знака отношения. В данном случае по координате \bar{y}_1 возникает режим динамического гашения колебаний. При следующем увеличении частоты совместные движения реализуются в форме противофазных движений координат \bar{y}_1 и \bar{y}_2 . В непосредственной близости к частоте изменения отношения амплитуд принимают большие значения. Для случая совместного действия внешних сил ($\alpha = 1$), как это следует из АЧХ, получим прямую $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega) = 1$, параллельную оси абсцисс, т.е. диада совершает движения, соответствующие свободным колебаниям по первой форме. В данном случае диада колеблется как единое целое и не зависит от частоты внешней силы. При $\alpha = -1$ с учетом $m_1 = m_2$ отношение

$\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = -1$ не зависит от частоты внешней силы, а массы движутся в противофазе, как это происходит при свободных колебаниях по второй форме в линейных цепных системах с двумя степенями свободы [10, 11].

3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАДЫ НА ВИД ЕЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Если коэффициент связности $\alpha = 0$, то на диаду действует одна сила \bar{Q}_1 , приложенная к массе m_1 . Передаточные функции диады в этом случае примут вид:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2}{p^2 [m_1 m_2 p^2 + k_2 (m_1 + m_2)]}; \quad (26)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{k_2}{p^2 [m_1 m_2 p^2 + k_2 (m_1 + m_2)]}. \quad (27)$$

Особенность передаточных функций заключается в том, что в начале координат они имеют бесконечно большое значение; при этом переменные \bar{y}_1 и \bar{y}_2 будут отрицательными.

На рис. 5 и 6 представлены АЧХ, полученные при следующих параметрах модельной задачи: $k_2 = 1000$ Н/м; α изменяется в пределах $-10, -5, -1, 0, +1, +5, +10$. Кроме того, рассматриваются три варианта соотношения масс: $m_1 = m_2 = m$; $m_1 = 2m, m_2 = m$; $m_1 = m, m_2 = 2m$.

АЧХ, построенные в соответствии с выражениями (26) и (27) для случаев $m_1 = m_2 = 10$ кг при $\alpha = -2, 0$ и $+2$, показаны на рис. 5.

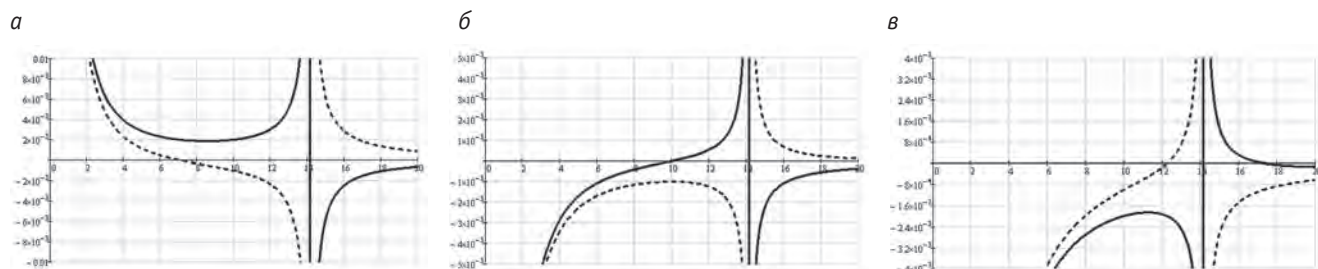


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики диады при $m_1 = m_2 = 10$ кг, $k_2 = 1000$ Н/м: а — $\alpha = -2$; б — $\alpha = 0$; в — $\alpha = +2$

На рис. 6 представлены АЧХ диады для условий $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 20$ кг, $k_2 = 1000$ Н/м при α , равных -2 , 0 и $+2$.

АЧХ диады при параметрах $m_1 = 20$ кг, $m_2 = 10$ кг, $k_2 = 1000$ Н/м и разных значениях α приведены на рис. 7.

Как показывает анализ АЧХ, реализуемых при различных значениях параметров, коэффициент связности внешних сил α может существенно влиять на вид АЧХ и возникающие динамические эффекты. Большую роль играет также подбор значений массоинерционных и жесткостных параметров, что соответствующим образом формирует систему частотных свойств диады. Некоторые аспекты рассматриваемых вопросов затронуты в [18–20].

4. ПОСТРОЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ДИАГРАММЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВУХ ВНЕШНИХ СИЛ

Частоты динамического гашения колебаний зависят от параметра настройки α , что определяется выражениями:

$$\omega_{1\text{дин}}^2 = \frac{k_2(1+\alpha)}{m_2}; \quad (28)$$

$$\omega_{2\text{дин}}^2 = \frac{k_2(1+\alpha)}{\alpha m_1}. \quad (29)$$

При $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$ частоты динамического гашения в диаде совпадают, тогда:

$$\omega_{1\text{дин}}^2 = \omega_{2\text{дин}}^2 = \frac{k_2(m_1+m_2)}{m_1 m_2}; \quad (30)$$

$$W_{21}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2 \frac{(m_1+m_2)}{m_1}}{m_2 p^2 + k_2 \frac{(m_1+m_2)}{m_1}} = 1. \quad (31)$$

Если рассматривать график $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$, то при $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$ он вырождается в прямую $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$. При других значениях α будут иные формы графиков зависимостей.

Диаграмма частот дает представление о свойствах системы в целом: $\omega_{\text{соб}}$ — постоянна; n_1 и n_2 — постоянны; $\omega_{1\text{дин}}$ и $\omega_{2\text{дин}}$ могут быть равны между собой при $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$; \bar{y}_1 и \bar{y}_2 будут равны нулю одновременно на частоте собственных колебаний; в одной точке пересекаются три графика зависимостей $\omega_{\text{соб}}^2(\alpha)$,

$$\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha) = f_1(\alpha) \text{ и } \omega_{2\text{дин}}^2(\alpha) = f_2(\alpha).$$

Для оценки свойств частотной диаграммы рассмотрим случай совпадения частот динамического гашения колебаний.

Здесь $\omega_{1\text{дин}}^2 = \frac{k_2(1+\alpha)}{m_2} = \omega_{2\text{дин}}^2 = \frac{k_2(1+\alpha)}{\alpha m_1}$, что дает соотношение $\alpha = \frac{m_2}{m_1}$. Если определить при таком значении передаточную функцию межпарциальной связи, то она соответствует выражению $W_{21}(p) = 1$. В этом случае диада движется как единое твердое тело.

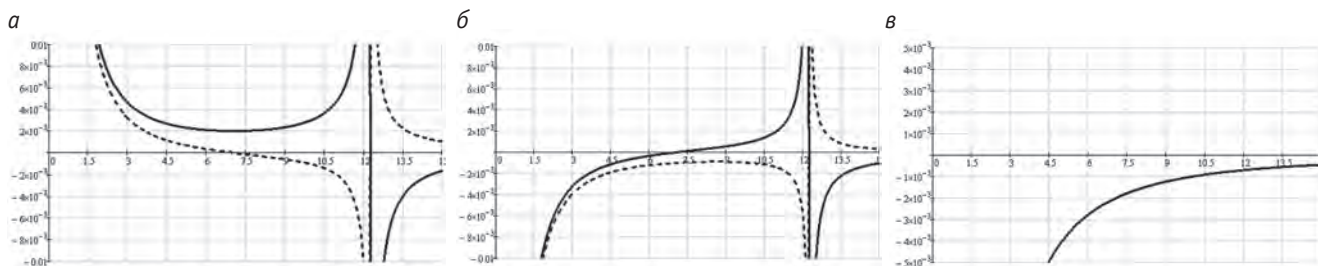


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики диады при $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 20$ кг, $k_2 = 1000$ Н/м:
 a — $\alpha = -2$; $б$ — $\alpha = 0$; $в$ — $\alpha = +2$

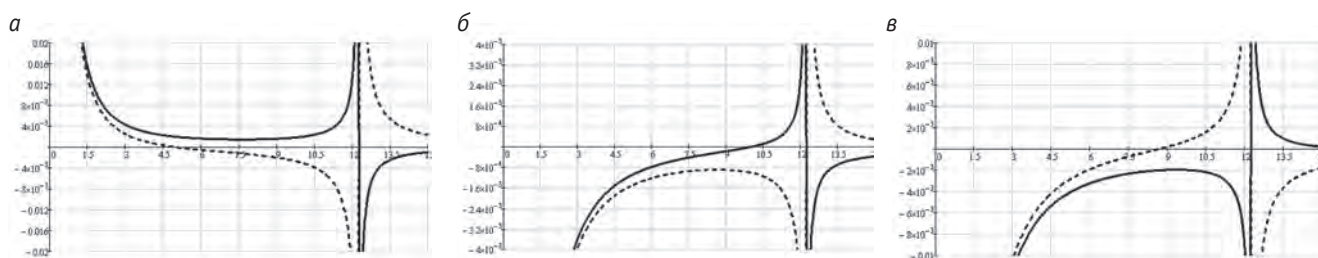


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики диады при $m_1 = 20$ кг, $m_2 = 10$ кг, $k_2 = 1000$ Н/м:
 a — $\alpha = -2$; $б$ — $\alpha = 0$; $в$ — $\alpha = +2$

На частотной диаграмме (рис. 8) имеются характерные точки 1 и 2. Точка 1 определяет частоту, на которой одновременно пересекаются графики трех зависимостей: $\omega_{\text{соб}}^2(\alpha)$, $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$. При этом частота собственных колебаний не зависит от α . В точке 1 одновременно совпадают частоты динамического гашения колебаний по двум координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2 . Однако совместное существование таких режимов, т.е. совпадение резонансных эффектов с динамическим гашением колебаний, не является рациональным для реализации, так как при незначительных отклонениях параметров системы на частоте собственных колебаний будут возникать неустойчивые процессы динамических взаимодействий. При подстановке в передаточную функцию межпарциальных связей

$$\alpha = \alpha_{\text{кр}} = \frac{m_2}{m_1} \text{ получим } \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1.$$

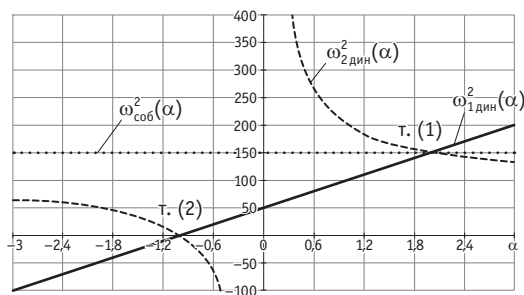


Рис. 8. Частотная диаграмма диады при одновременном действии двух внешних возмущений, приведенных к массинерционному элементу m_1

В точке 1 на оси абсцисс (см. рис. 8) происходит пересечение графиков $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$, что не несет информации о возможности совместного режима динамического гашения колебаний по двум координатам y_1 и y_2 . В физическом смысле эта ситуация может быть истолкована таким образом, что частота реализации данного эффекта будет нулевой. В этом случае можно полагать, что одна из двух частот собственных колебаний диады (нулевая) имеет график зависимости $\omega_{\text{соб}}^2(\alpha)$, совпадающий с осью абсцисс.

Таким образом, диада при определенных условиях, которые создаются при одновременном действии двух внешних сил, связанных между собой (коэффициент связности внешних воздействий α), может существенно изменять динамические свойства с проявлениями ряда особых состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свойства диады как некоторого структурного образования, обладающего фундаментальными свойствами в своих реакциях и формах проявления динамических взаимодействий, достаточно разнообразны.

1. Существенное влияние на динамические свойства и эффекты оказывают совместные внешние силовые воздействия, которые функционально связаны между собой и могут определяться вводимым для этих целей коэффициентом связности внешних сил α .

2. Влияние коэффициента связности внешних сил α проявляется в динамических свойствах диады через изменения частот динамического гашения колебаний. При отсутствии связности внешних сил ($\alpha = 0$) парциальные частоты диады формируются только параметрами ее парциальных блоков (или систем). При $\alpha = 0$ парциальные частоты идентифицируются одновременно и как соответствующие частоты динамического гашения колебаний. Отметим, что имеется в виду одиночное действие внешней силы на тот или иной инерционный элемент (m_1 или m_2).

3. При одновременном действии двух внешних сил ($\alpha \neq 0$) режимы динамического гашения колебаний изменяются — они становятся зависимыми от коэффициента связности внешних сил α . В этом случае режим динамического гашения колебаний может идентифицироваться как некоторое обобщенное понятие, связанное с передаточными функциями диады. В таком восприятии режим динамического гашения колебаний и его параметры связаны с «обнулением» числителя передаточной функции диады. Что касается частоты собственных колебаний, то она определяется при «обнулении» знаменателя передаточной функции диады. В этом случае подход предполагает возможность появления такой ситуации, когда частотное характеристическое уравнение может приобретать возможности вариации своих коэффициентов в зависимости от воздействий со стороны специально формируемых и вводимых в систему устройств.

4. При наличии связности внешних сил реализовать режим одновременного динамического гашения колебаний по двум координатам диады не представляется возможным. Это объясняется тем, что частоты динамического гашения колебаний и собственные частоты совпадают. Физическая реализация устойчивого процесса динамических взаимодействий в таких условиях не может быть обеспечена.

5. Для оценки возможности изменения динамических свойств систем при изменениях коэффициента связности внешних сил α предлагается использовать метод построения частотных динамических диаграмм.

Литература

1. Пановко Г. Я. Динамика вибрационных технологических процессов. М. : Ижевск, 2006. 176 с.
2. Елисеев А. В., Сельвинский В. В., Елисеев С. В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударивающих связей. Новосибирск : Наука, 2015. 332 с.
3. De Silva C. W. Vibration: Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press, 2000. 957 p.

References

1. Panovko G. Ya. Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov [Dynamics of vibrational technological processes]. M. : Izhevsk, 2006. 176 s.
2. Eliseev A. V., Sel'vinskiy V. V., Eliseev S. V. Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushchikh svyazey [Dynamics of vibrational interactions of elements of technological systems with allowance for non-retentive bonds]. Novosibirsk : Nauka, 2015. 332 s.
3. De Silva C. W. Vibration: Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press, 2000. 957 p.

4. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. 708 p.
5. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
6. Анализ вероятности безотказной работы электровозов на Красноярской железной дороге / М. Н. Петров, А. И. Орленко, О. А. Терегулов, Э. В. Лукьянов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 5. С. 77–83. ISSN 0869-4176.
7. Орленко А. И., Терегулов А. И., Лукьянов Э. В. Статистический анализ повреждений тягового подвижного состава на примере железных дорог Сибирского региона : моногр. ; под. ред. проф. М. Н. Петрова. Красноярск : КРИЖТ ИрГУПС, 2014. 128 с.
8. Elliott S. Signal Processing for Active Control. L. : Academic Press, 2000. 517 p.
9. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Транспорт, 1997. 326 с.
10. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. И. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. Иркутск : ИГУ, 2008. 523 с.
11. Елисеев С. В., Резник Ю. И., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск : Наука, 2011. 384 с.
12. Елисеев С. В., Хоменко А. П. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования. Новосибирск : Наука, 2014. 357 с.
13. Dynamics of mechanical system with additional ties / S. V. Eliseev, E. V. Lukyanov, Yu. I. Reznik, A. P. Khomenko. Irkutsk, 2006. 315 p.
14. Белокобыльский С. В., Елисеев С. В., Ситов И. С. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи. СПб. : Политехника, 2013. 319 с.
15. Генкин М. Д., Рябой В. М. Упруго-инерционные виброизолирующие системы. Предельные возможности, оптимальные структуры. М. : Наука, 1988. 191 с.
16. Елисеев С. В., Кинаш Н. Ж., Каимов Е. В. Рычажные связи механических колебательных систем // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2015. № 1 (69). С. 112–126. ISSN 1816-1928.
17. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М. : Мир, 1978. 283 с.
18. Банина Н. В. Структурные методы динамического синтеза колебательных систем с учетом особенностей физических реализаций обратных связей : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск : ИрГУПС, 2006. 198 с.
19. Динамическое гашение колебаний: введение дополнительных связей, рычажные взаимодействия и физические эффекты / С. В. Елисеев, В. Б. Кашуба, Н. Ж. Кинаш, А. В. Елисеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 1 (120). С. 10–23. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-10-23. ISSN 1814-3520.
20. К вопросу о математической модели цепной механической системы / С. В. Белокобыльский, А. В. Елисеев, И. С. Ситов, А. И. Артюнин // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 7–18. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-7-18. ISSN 2077-5415.
4. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. 708 p.
5. Eliseev S. V., Artyunin A. I. Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineynykh mekhanicheskikh system [Applied theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk : Nauka, 2016. 459 s.
6. Analiz veroyatnosti bezotkaznoy raboty elektrovozov na Krasnoyarskoy zheleznoy doroge [The analysis of probability of no-failure operation of electric locomotives on Krasnoyarsk Railway] / M. N. Petrov, A. I. Orlenko, O. A. Teregulov, E. V. Luk'yanov // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2012. № 5. С. 77–83. ISSN 0869-4176.
7. Orlenko A. I., Teregulov A. I., Luk'yanov E. V. Statisticheskiy analiz povrezhdeniy tyagovogo podvizhnogo sostava na primere zheleznynykh dorog Sibirskogo regiona : monogr. ; pod. red. prof. M. N. Petrova [Statistical analysis of damage to traction rolling stock on the example of railways in the Siberian Region : monograph]. Krasnoyarsk : KriZhT IrGUPS, 2014. 128 s.
8. Elliott S. Signal Processing for Active Control. L. : Academic Press, 2000. 517 p.
9. Kogan A. Ya. Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom [Dynamics of the way and its interaction with the rolling stock]. M. : Transport, 1997. 326 s.
10. Dinamicheskiy sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical objects] / S. V. Eliseev, Yu. I. Reznik, A. P. Khomenko, A. A. Zasyadko. Irkutsk : IGU, 2008. 523 s.
11. Eliseev S. V., Reznik Yu. I., Khomenko A. P. Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh system [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillation systems]. Novosibirsk : Nauka, 2011. 384 s.
12. Eliseev S. V., Khomenko A. P. Dinamicheskoe gashenie kolebaniy: kontseptsiya obratnoy svyazi i strukturnye metody matematicheskogo modelirovaniya [Dynamic vibration damping: feedback concept and structural methods of mathematical modeling]. Novosibirsk : Nauka, 2014. 357 s.
13. Dynamics of mechanical system with additional ties / S. V. Eliseev, E. V. Lukyanov, Yu. I. Reznik, A. P. Khomenko. Irkutsk, 2006. 315 p.
14. Belokobyl'skiy S. V., Eliseev S. V., Sitov I. S. Dinamika mekhanicheskikh sistem. Rychazhnye i inertionno-uprugie svyazi [Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial-elastic couplings]. SPb. : Politehnika, 2013. 319 s.
15. Genkin M. D., Ryaboy V. M. Uprugo-inertsionnye vibroizoliruyushchie sistemy. Predel'nye vozmozhnosti, optimal'nye struktury [Elastic-inertial vibration isolation systems. Limit possibilities, optimal structures]. M. : Nauka, 1988. 191 s.
16. Eliseev S. V., Kinash N. Zh., Kaimov E. V. Rychazhnye svyazi mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [Lever ties of mechanical oscillatory systems] // Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroeniya. 2015. № 1 (69). С. 112–126. ISSN 1816-1928.
17. Lenk A. Elektromekhanicheskie sistemy. Sistemy s sosredotochennymi parametrami [Electromechanical systems. Lumped parameter systems]. M. : Mir, 1978. 283 s.
18. Banina N. V. Strukturnye metody dinamicheskogo sinteza kolebatel'nykh sistem s uchetom osobennostey fizicheskikh realizatsiy obratnykh svyazey : dis. ... kand. tekhn. nauk [Structural methods of dynamic synthesis of oscillatory systems taking into account the features of physical realizations of feedbacks : PhD in Engineering Thesis]. Irkutsk : IrGUPS, 2006. 198 s.
19. Dinamicheskoe gashenie kolebaniy: vvedenie dopolnitel'nykh svyazey, rychazhnye vzaimodeystviya i fizicheskie efekty [Dynamic damping of oscillations: introduction of additional ties, lever interactions and physical effects] / S. V. Eliseev, V. B. Kashuba, N. Zh. Kinash, A. V. Eliseev // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. Т. 21. № 1 (120). С. 10–23. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-10-23. ISSN 1814-3520.
20. K voprosu o matematicheskoy modeli tsepnoy mekhanicheskoy sistemy [On the issue of mathematical model of chain mechanical system] / S. V. Belokobyl'skiy, A. V. Eliseev, I. S. Sitov, A. I. Artyunin // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2017. № 1 (33). С. 7–18. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-7-18. ISSN 2077-5415.

УДК 621.436

Никита Игоревич Григорьев, кандидат технических наук, начальник отдела компоновки двигателей и силовых установок службы главного конструктора ООО «Уральский дизель-моторный завод» (УДМЗ), старший преподаватель 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 Валерьевич Плотников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛА МИЛЛЕРА

Nikita Igorevich Grigoryev, PhD in Engineering, Head of Layout Design Group, LLC Ural Diesel Motor Plant, Senior Lecturer, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Sergeyevich 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 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

Improving the economic and environmental characteristics of diesel engine by application of Miller's cycle

Аннотация

Улучшение экологических показателей поршневых двигателей — одна из самых актуальных задач в развитии двигателестроения. В статье рассмотрены результаты модернизации тепловозного дизельного двигателя 8ЧН 21/21 за счет применения цикла Миллера. Приведены диаграммы фаз газораспределения для базового дизеля и дизеля с циклом Миллера. На основе стендовых испытаний построены сравнительные диаграммы вредных выбросов и графики удельного расхода топлива. Установлено, что внедрение цикла Миллера приводит к снижению содержания NO_x на 16 %, CO — на 50, CH — на 54 % при одновременном сокращении удельного эффективного расхода топлива вплоть до 4,6 %.

Ключевые слова: поршневой двигатель внутреннего сгорания, цикл Миллера, экология, вредные выбросы, дымность, технико-экономические показатели поршневых ДВС.

Summary

Currently improving the environmental performance of reciprocating engines is an urgent task in the development of engine building. The results of the modernization of the diesel engine (21/21 dimension) by applying the Miller's cycle are considered in the article. The valve timing diagrams for the basic diesel and the Miller's cycle diesel are shown in the article. The comparative emissions chart and graphs of specific fuel consumption were obtained on the basis of tests. It was found that the NO_x reduction is 16 %, the CO reduction is 50 %, the CH reduction is 54 % when the Miller's cycle is applied. At the same time, a decrease in the specific fuel consumption is observed up to 4.6 %.

Keywords: piston internal combustion engine, Miller's cycle, ecology, harmful emissions and smokiness, technical and economic characteristics of piston ICE.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-64-67

Современное развитие поршневых двигателей внутреннего сгорания напрямую связано с повышением их топливной экономичности и экологичности [1–3]. Добиться этого можно за счет более полного сгорания топлива в цилиндре. К числу основных факторов, влияющих на полноту сгорания топлива, относятся наполнение цилиндра воздухом и организация смесеобразования и сгорания топлива. В настоящее время широко распространенными направлениями по совершенствованию этих процессов являются увеличение давления наддува и рост давления впрыска топлива в аккумуляторных системах [1–6]. Однако следует отметить тенденцию снижения прироста энергоэффективности дизелей при проработке перспективных систем наддува со степенью повышения давления в диапазоне от 5 до 7 и давления впрыска топлива более 250 МПа [4, 7]. Эти ограничения заставили вновь обратить внимание инженеров и исследователей на улучшение рабочего процесса дизелей, в частности на применение цикла Миллера.

Идея повышения эффективности поршневого двигателя за счет сокращения хода сжатия и увеличения хода расширения рабочего тела была предложена Дж. Аткинсоном еще в 1882 г. Однако ее реализация требовала создания очень сложных механизмов двигателя. В 1947 г. Р. Миллер предложил альтернативный способ — организовать рабочий процесс с ранним или поздним закрытием впускного клапана в рамках конструкции традиционно-го поршневого двигателя [8]. В первом случае впускной клапан закрывается до прихода поршня к нижней мертвой точке — НМТ

(так называемый укороченный выпуск), и происходит некоторое расширение воздуха, прежде чем он начнет сжиматься. Во втором случае при движении поршня от НМТ и до момента закрытия впускного клапана некоторое количество воздуха вытесняется обратно во впускной коллектор (так называемое укороченное сжатие). Оба варианта позволяют снизить фактическую степень сжатия рабочей смеси относительно геометрической при сохранении неизменной степени расширения. Это приводит к некоторому понижению температуры воздуха и позволяет уменьшить уровень тепловой напряженности рабочего процесса.

В данной статье рассмотрено влияние цикла Миллера (укороченный выпуск) и одновременного изменения продолжительности процесса выпуска на экологические и технико-экономические показатели тепловозного дизеля 8ЧН 21/21 производства ООО «Уральский дизель-моторный завод».

Дизель 8ЧН 21/21 представляет собой 4-тактный двигатель с V-образным расположением цилиндров под углом 90°, с непосредственным впрыском топлива, с турбокомпрессором и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Номинальная мощность двигателя составляет 930 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹.

Для перевода дизеля 8ЧН 21/21 на цикл Миллера были изменены фазы газораспределения (рис. 1):

начало процесса впуска сдвинуто на 9° поворота коленчатого вала, ближе к моменту прохождения поршнем верхней мертвой точки — ВМТ (открытие впускных клапанов за 45° до ВМТ при 54° у базового двигателя);

закрытие впускных клапанов смещено на 5° до момента прохождения поршнем нижней мертвой точки (угол закрытия впускных клапанов базового двигателя — 42° после НМТ). Таким образом, продолжительность процесса впуска снизилась на 56° поворота коленчатого вала (составила 220°, в то время как у базового двигателя — 276°);

начало процесса выпуска перенесено на 9° поворота коленчатого вала от момента прохождения поршнем НМТ (угол открытия выпускных клапанов — 80°, у базового двигателя — 71° до НМТ);

конец процесса выпуска сдвинут на 7° от момента прохождения поршнем ВМТ (угол закрытия выпускных клапанов у базового двигателя — 60° после ВМТ, у модернизированного — 53°). Соответственно продолжительность процесса выпуска увеличилась на 16° (у базового двигателя — 304°, у модернизированного — 320°). При этом продолжительность продувки цилиндров сократилась со 113 до 75°.

Таким образом, в данном случае осуществлялась комплексная модернизация фаз газораспределения дизеля 8ЧН 21/21 за счет применения цикла Миллера (для процесса впуска) и изменения моментов открытия и закрытия выпускного клапана для процесса выпуска отработавших газов.

В связи с использованием новых фаз газораспределения изменениям подвергся профиль кулачков распределительного вала. Сравнение кулачков впускных клапанов базового и модернизированного дизелей показало (рис. 2), что с применением цикла Миллера область максимального открытия клапана существенно сократилась, кроме того, изменился профиль частичного открытия клапанов.

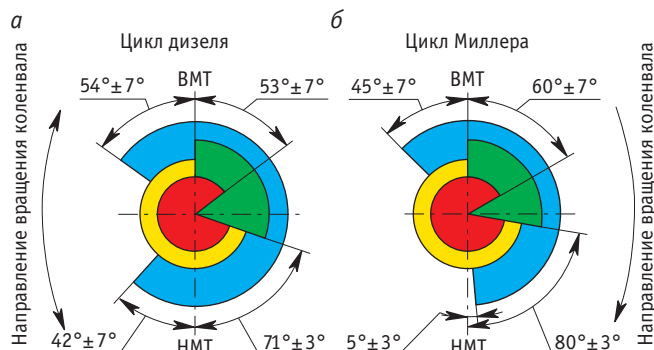


Рис. 1. Диаграммы фаз газораспределения двигателя 8ЧН 21/21 с циклом дизеля (а) и циклом Миллера (б):

■ — впуск; ■ — сжатие; ■ — расширение (расширение в данном случае рассматривается как период от ВМТ до открытия выпускного клапана); ■ — выпуск

Для получения данных по экологичности при переводе базового дизеля на цикл Миллера были проведены стендовые испытания по измерению удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ в отработавших газах, которые контролировались с целью проверки соблюдения требований ГОСТ Р 51249 [9] и ГОСТ Р 51250 [10].

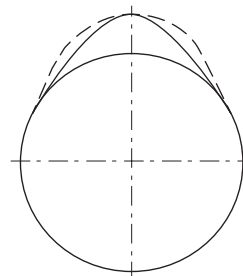


Рис. 2. Сравнение кулачков дизеля с применением цикла Миллера (сплошная линия) и базового дизеля (пунктирная линия)

В ходе испытаний исследовались следующие нормируемые параметры:

удельный средневзвешенный выброс оксида углерода e_{CO}^P ;

удельный средневзвешенный выброс оксидов азота e_{NOx}^P ;

удельный средневзвешенный выброс суммы углеводородов e_{CH}^P ;

дымность отработавших газов.

Циклы испытаний дизеля (режимы работы с определенной частотой вращения, нагрузкой и крутящим моментом) выбраны в соответствии с ГОСТ 30574 [11] (табл. 1).

Для измерения концентраций вредных веществ (CO, NO_x и CH) использовались газоанализатор ГИАМ-29 с допускаемой погрешностью до ± 0,025 об.% и анализатор отработавших газов FEVER с допускаемой погрешностью 1,0 %.

По результатам испытаний были определены удельные средневзвешенные выбросы i -го вредного вещества e_i^P в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ Р 51249–99 [9] и ГОСТ Р 51250–99 [10].

Таблица 1

Циклы испытаний дизеля 8ЧН 21/21

| Номер режима цикла | Частота вращения коленчатого вала двигателя | Крутящий момент, % |
|--------------------|--|--------------------|
| 1 | Минимальная устойчивая частота — холостой ход (620 мин^{-1}) | 0 |
| 2 | Промежуточная частота вращения (% от номинальной) | 15 |
| 3 | | 30 |
| 4 | | 50 |
| 5 | | 65 |
| 6 | | 75 |
| 7 | | 90 |
| 8 | Номинальная частота вращения (1500 мин^{-1}) | 100 |
| 9 | Максимальная частота вращения (110% от номинальной) | 110 |

Данные о вредных выбросах и дымности отработавших газов для базового и модернизированного дизелей приведены в табл. 2.

Из данных, полученных в ходе испытаний (см. табл. 2), видно, что базовый двигатель 8ЧН 21/21 удовлетворяет требованиям нормативных документов, тем не менее запас по содержанию вредных веществ и дымности отработавших газов является относительно небольшим. Следует отметить, что в связи с тенденциями ужесточения требований к охране окружающей среды и экологии этот запас может быть довольно быстро исчерпан, соответственно базовый двигатель перестанет соответствовать экологическим критериям. В то же время применение цикла Миллера позволяет существенно уменьшить содержание вредных выбросов: NO_x — на 16 %, CO — на 50, CH — на 54 % по сравнению с базовым двигателем. Кроме того, при этом дымность отработавших газов снижается практически в 2 раза.

Таблица 2

Результаты расчета вредных выбросов и дымности

| Параметр | Базовый дизель | Дизель с циклом Миллера | Нормативные значения |
|--|----------------|-------------------------|----------------------|
| Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота (NO_x), приведенный к NO_{2x} , г/(кВт·ч) | 11,2 | 9,4 | 12,0* |
| Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), г/(кВт·ч) | 2,13 | 1,0 | 3,0* |
| Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), приведенный к $\text{CH}_{1,85}$, г/(кВт·ч) | 0,87 | 0,4 | 1,0* |
| Дымность | 0,29 | 0,15 | 0,351** |

* По ГОСТ Р 51249–99 [9]. ** По ГОСТ Р 51250–99 [10].

В ходе испытаний также был произведен замер удельного эффективного расхода топлива при работе по тепловозной характеристике. Как видно из диаграммы, представленной на рис. 3, на режимах работы двигателя с частотой вращения

коленчатого вала свыше 800 мин^{-1} удельный расход топлива сокращается на 2,3–4,6 %. При этом максимальное снижение наблюдается на частичных режимах (65–80 % от номинальной мощности двигателя), которые являются основными для поршневых двигателей тепловозного назначения.

Следует отметить, что на низких частотах вращения $520\text{--}800 \text{ мин}^{-1}$ удельный расход топлива у модернизированного дизеля выше, чем у базового. Скорее всего, данное обстоятельство связано с работой турбокомпрессора на этих режимах, поскольку его проточные части подбираются для эффективной работы дизеля на частотах вращения коленчатого вала, близких к номинальной.

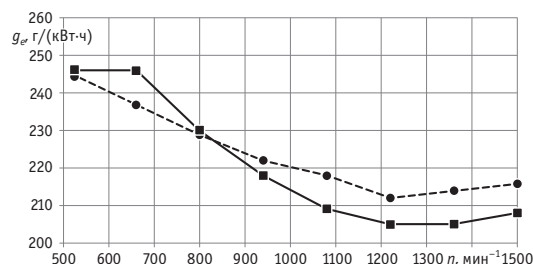


Рис. 3. Зависимости удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения коленчатого вала n для базового (пунктирная линия) и модернизированного (сплошная линия) дизелей

ВЫВОДЫ

1. Модернизация двигателя 8ЧН 21/21 за счет применения цикла Миллера (изменения фаз газораспределения) приводит к снижению содержания вредных выбросов: NO_x — на 16 %, CO — на 50, CH — на 54 %. Это позволит использовать данный двигатель при проектировании перспективных тепловозов с повышенными экологическими требованиями.

2. Снижение содержания NO_x также свидетельствует о том, что раннее закрытие впускных клапанов дает возможность понизить температуру воздуха в процессе впуска, а соответственно и среднюю температуру цикла дизеля. Это должно привести к уменьшению тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы и выпускной системы, а следовательно, повысить надежность двигателя в целом.

3. Комплексная модернизация дизеля 8ЧН 21/21 позволяет повысить эффективность его рабочего цикла — по сравнению с базовым двигателем удельный расход топлива снижается вплоть до 4,6 %.

4. В целом, как показывают выполненные исследования, применение цикла Миллера положительно влияет на технические и экологические параметры дизеля 8ЧН 21/21, а запас по величине вредных выбросов на модернизированном двигателе создает возможности его дальнейшего форсирования за счет использования наддува с более высокой степенью повышения давления в компрессоре и минимизирует риски, связанные с ухудшением рабочих характеристик и показателей надежности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00004.

Литература

1. Шароглазов Б. А., Шишков В. В. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов : учеб. по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» ; под ред. заслуж. деят. науки РФ, проф., д-ра техн. наук Б. А. Шароглазова. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 525 с.
2. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы : учеб. для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 720 с.
3. Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учеб. для студ. высш. учеб. заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашиностроение» / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков ; под ред. Н. Д. Чайнова. М. : Машиностроение, 2008. 496 с.
4. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : учеб. для вузов. М. : Легион-Автодата, 2004. 344 с.
5. Совершенствование процессов в газоздушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания / Б. П. Жилкин, В. В. Лашманов, Л. В. Плотников, Д. С. Шестаков. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2015. 228 с.
6. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ЧН 21/21 с российскими турбокомпрессорами ТКР180 // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.
7. Грехов Л. В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail. М. : Изд-во МГТУ, 2000. 64 с.
8. Белоусов Е. В., Чернявский В. В. Цикл Миллера и его реализация в судовых дизельных двигателях // Двигатели внутреннего сгорания. 2013. № 1. С. 127–132. ISSN 0419-8719.
9. ГОСТ Р 51249–99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. М. : ИПК Издательство стандартов, 2005. 18 с.
10. ГОСТ Р 51250–99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. М. : ИПК Издательство стандартов, 2005. 15 с.
11. ГОСТ 30574–98. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов. Циклы испытаний. М. : ИПК Издательство стандартов, 1999. 15 с.

References

1. Sharoglazov B. A., Shishkov V. V. Porshnevye dvigateli: teoriya, modelirovaniye i raschet protsessov : ucheb. po kursu «Teoriya rabochikh protsessov i modelirovaniye protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya» ; pod red. zasluzh. deyat. nauki RF, prof., d-ra techn. nauk B. A. Sharoglazova [Piston engines: theory, modeling and calculation processes : textbook]. Chelyabinsk : Izd. tsentr YuUrGU, 2011. 525 s.
2. Kavtaradze R. Z. Teoriya porshnevykh dvigateley. Spetsialnye glavy : ucheb. dlya vuzov [Theory piston engines. Special chapters : textbook]. M. : Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2008. 720 s.
3. Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya : ucheb. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy, obuchayushchikhsya po spetsialnosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» napravleniya podgotovki «Energomashinostroyeniye» / N. D. Chaynov, N. A. Ivashchenko, A. N. Krasnokutskiy, L. L. Myagkov ; pod red. N. D. Chaynova [Construction of an internal combustion engine : textbook]. M. : Mashinostroyeniye, 2008. 496 s.
4. Grekhov L. V., Ivashchenko N. A., Markov V. A. Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizelej : ucheb. dlya vuzov [Fuel equipment and control systems for diesel engines : textbook]. M. : Legion-Avtodata, 2004. 344 s.
5. Sovershenstvovaniye protsessov v gazovozdushnykh traktakh porshnevykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Perfection of processes in gas-air tracts of reciprocating internal combustion engines] / B. P. Zhilkin, V. V. Lashmanov, L. V. Plotnikov, D. S. Shestakov. Ekaterinburg : Izd-vo UrFU, 2015. 228 s.
6. Shestakov D. S., Pronin I. E. Dovodka rabocheho protsessa teplovoznykh dizeley 8CHN 21/21 s rossiyskimi turbokompressorami TKR180 [Adjustment of operation of 8CHN 21/21 diesel locomotive engines with Russian TKR180 turbochargers] // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.
7. Grekhov L. V. Akkumulyatornye toplivnye sistemy dvigateley vnutrennego sgoraniya tipa Common Rail [Accumulator fuel systems of internal combustion engines of the type as Common Rail]. M. : Izd-vo MG TU, 2000. 64 s.
8. Belousov E. V., Chernyavskiy V. V. Tsikl Millera i ego realizatsiya v sudovykh dizeľnykh dvigatelyakh [Miller's cycle and its implementation in ship diesel engines] // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. 2013. № 1. S. 127–132. ISSN 0419-8719.
9. GOST R 51249-99. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Vybrosov vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami. Normy i metody opredeleniya [Reciprocating internal combustion engines. Emissions of harmful substances with exhaust gases. Norms and methods of determination]. M. : IPK Izdatel'stvo standartov, 2005. 18 s.
10. GOST R 51250-99. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Dymnost' otrabotavshikh gazov. Normy i metody opredeleniya [Reciprocating internal combustion engines. The smoke of exhaust gases. Norms and methods of determination]. M. : IPK Izdatel'stvo standartov, 2005. 15 s.
11. GOST 30574-98. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevye. Vybrosov vrednykh veshchestv i dymnost' otrabotavshikh gazov. Tsikly ispytaniy [Reciprocating internal combustion engines. Emissions of harmful substances and smoke of exhaust gases. Test cycles]. M. : IPK Izdatel'stvo standartov, 1999. 15 s.

УДК 629.464.47

Геннадий Львович Аккерман, доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия, Ольга Олеговна Тимошенко, и. о. инженера I категории, Чуриловская дистанция пути, Южно-Уральская дирекция инфраструктуры Южно-Уральской железной дороги (ЮУДИ ЮУЖД), Челябинск, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДВЫБРОСНОГО СОСТОЯНИЯ ПУТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОМЕРОВ ВАГОНОВ-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЕЙ

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

Olga Olegovna Timoshenko, Acting. Engineer of the 1st category, Churilovskaya Track Distance, South Urals Infrastructure Directorate, South Ural Railway, Chelyabinsk, Russia

Determination of the pre-emission state of the track based on the results of measurements of the wagon-tracker

Аннотация

Статья посвящена решению актуальной задачи, связанной с прогнозированием предвыбросного состояния бесстыкового пути. Предложено ранжировать участки рихтовок — неровностей пути в плане, показанных вагоном-путеизмерителем на отдельных перегонах, по таким критериям, как скорость и ускорение изменения отступлений в плане по длине, коэффициент фактического состояния пути, фактическое значение наибольшего превышения температуры рельса над температурой его закрепления.

Ключевые слова: предвыбросное состояние бесстыкового пути, вагон-путеизмеритель, скорость и ускорение изменения отступлений в плане по длине, коэффициент фактического состояния пути, температура рельса, температура закрепления рельса.

Summary

The article is devoted to the solution of the actual problem connected with forecasting of the pre-emission state of the weldless path. It is proposed to rank the areas of alignments — the unevenness of the path in the plan shown by the wagon-tracker on separate trips, according to such criteria as speed and acceleration of changes in deviations in plan along the length, the coefficient of the actual state of the track, the actual value of the maximum elevation of the rail temperature over the temperature of its fastening.

Keywords: pre-emission state of the weldless path, wagon-tracker, speed and acceleration of changes in deviations in plan along the length, the coefficient of actual track condition, rail temperature, rail fastening temperature.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-68-71

На сегодняшний день по результатам проходов вагонов-путеизмерителей можно определить фактическое состояние железнодорожного пути. Однако применяемого на практике общепризнанного алгоритма количественной оценки запаса устойчивости бесстыкового пути против выброса до сих пор нет. Используемые в настоящее время методики обладают как рядом преимуществ, так и большим количеством упрощений, недоработок и допущений, что, несомненно, отдаляет полученные при расчетах значения от реального результата. Следует также отметить, что методики, расчет пути по которым довольно прост, не обеспечивают достаточной точности результатов, а высокоточные численные методы, наоборот, дают требуемую точность, но являются сложными и тем самым усиливают влияние человеческого фактора на полученные данные. Таким образом, разработка алгоритма определения предвыбросного состояния бесстыкового пути по результатам промеров вагонов-путеизмерителей позволит решить актуальную проблему, связанную с эксплуатацией бесстыкового пути и обеспечением безопасности движения поездов. Поскольку неровность пути в плане (рихтовка) — это самое массово контролируемое отступление, влияющее на устойчивость плетей, дальнейшие расчеты связаны именно с ним.

Одним из способов определения предвыбросного состояния пути по результатам промеров вагонов-путеизмерителей является анализ скорости и ускорения изменения отступлений в плане по длине. Для этого в прямоугольной системе координат (рис. 1) аппроксимируем параболой рихтовку по узлам A , B , C .

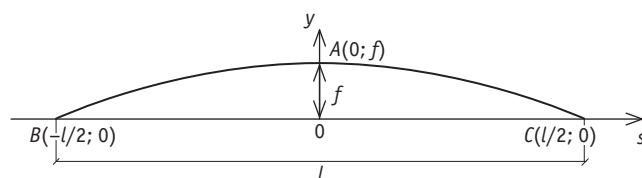


Рис. 1. Аппроксимация отступления пути в плане параболой

Получим уравнение отступления пути в плане:

$$f - \frac{4 \cdot f}{l^2} \cdot s^2 = y, \quad (1)$$

где f — величина отступления пути в плане (амплитуда рихтовки);
 l — длина отступления, зафиксированная вагоном-путеизмерителем;

s — рассматриваемый участок рихтовки (расстояние от узла B);

y — величина отступления на рассматриваемом участке рихтовки.

Взяв первую производную, найдем скорость (2), взяв вторую, получим ускорение изменения стрелы изгиба по длине (3):

$$\frac{dy}{ds} = -\frac{8 \cdot f}{l^2} \cdot s; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y}{ds^2} = -\frac{8 \cdot f}{l^2}. \quad (3)$$

Чем больше эти величины, тем менее устойчив данный участок пути.

Предположим, что отступления бесстыкового пути в плане вызваны действием сжимающей температурной силы, которая стремится изогнуть его в горизонтальной плоскости (т.е. вправо или влево). Изгибу рельса препятствует сила сопротивления шпал поперечному сдвигу, выраженная распределенной нагрузкой, которая направлена в противоположную от изгиба сторону. Найдем значение силы F , при котором будет преодолена распределенная нагрузка и изгиб рельса составит величину рихтовки (рис. 2).

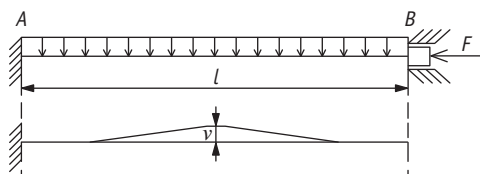


Рис. 2. Расчетная схема определения сжимающей силы

Если стержень обладает достаточной гибкостью, строим эпюры и, найдя $\vartheta_{п.с}$ (прогиб рельса по правилу Верещагина), определяем действующую в продольном направлении силу, которую необходимо приложить к рельсу, чтобы он изогнулся на величину зафиксированной рихтовки:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} > 100, \quad (4)$$

где $\mu = 0,5$ — коэффициент приведения длины;

I_y — минимальный момент инерции рельса;

A — площадь поперечного сечения рельса.

При данной расчетной схеме $\mu \cdot l$ равно длине рихтовки, зафиксированной вагоном-путеизмерителем.

Далее с помощью формулы Эйлера [1] находим величину изменения температуры рельса по сравнению с температурой его закрепления:

$$\Delta t = \frac{\pi^2 \cdot I_y}{2(\mu \cdot l)^2 \cdot \alpha \cdot A}, \quad (5)$$

где α — коэффициент линейного расширения рельсовой стали, равный $11,8 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

При гибкости стержня от 60 до 100 изменение температуры рельса в сравнении с температурой его закрепления определяем по формуле [1]

$$\Delta t = \frac{(a - b \cdot \lambda)}{\alpha \cdot E}, \quad (6)$$

где a и b — параметры, зависящие от материала стержня (для Р-65 $a = 350$ МПа, $b = 1,14$ МПа).

В остальных случаях путь считаем устойчивым.

Определить предвыбросное состояние пути возможно и с использованием закона Гука, согласно которому деформация, возникающая в упругом теле, пропорциональна приложенной к нему силе. Эту силу можем рассчитать, зная материал, размеры стержня, а также величину деформации. Сдвигу рельсошпальной решетки препятствует сопротивление шпал, поэтому к величине силы добавляем усилие на преодоление сопротивления поперечному сдвигу шпал [2]. А за величину деформации принимаем удлинение рельса вследствие изгиба. В результате находим изменение температуры рельсов относительно температуры их закрепления, соответствующее данной величине деформации.

Следует отметить, что на устойчивость пути против выброса влияют не только длина и амплитуда рихтовки, но также план участка, на котором она зафиксирована. Если хотя бы часть рихтовки не находится на прямом участке, принимаем ее расположение в кривой как худший случай.

В 2014 г. на основе ряда экспериментов и расчетов в среде конечно-элементного моделирования Д. В. Овчинниковым была определена величина поправочного коэффициента, снижающего устойчивость пути, в зависимости от плана участка, на котором расположена рихтовка, а также в зависимости от длины и амплитуды рихтовки (табл. 1) [3].

Кроме того, на устойчивость пути оказывают влияние шпалы с балластом. На основе вычислительного комплекса для создания конечно-элементной модели в результате теоретических исследований поперечной устойчивости бесстыкового пути было определено процентное снижение критических усилий в рельсовых плетях в зависимости от плана линии, а также от количества шпал с отступлениями плеча балластной призмы (табл. 2) [3].

С помощью этих данных можно определить коэффициент фактического состояния пути

$$K_{\text{факт}} = K_1 \cdot \frac{100 - K_2}{100}, \quad (7)$$

а также фактическое значение наибольшего превышения температуры рельсов по сравнению с температурой их закрепления, при котором будет обеспечиваться необходимый запас устойчивости бесстыкового пути против выброса [3]:

$$[\Delta t_y]_{\text{факт}} = K_{\text{факт}} \cdot [\Delta t_y], \quad (8)$$

где $[\Delta t_y]$ — нормативное значение наибольшего повышения температуры рельса, определенное по табл. П. 2.1 [4] и зависящее от плана участка, типа рельсов, шпал и вида щебня.

Повышение температуры на 15–20 град и более указывает на то, что устойчивость бесстыкового пути понижена и тре-

буются незамедлительные меры по устранению отступлений от норм содержания пути в плане и норм содержания балластной призмы. При разнице в 10–15 град устранение отступлений осуществляется в плановом порядке. В остальных случаях устойчивость пути полностью обеспечивается.

Чтобы упростить оценку предвыбросного состояния бесстыкового пути, а также минимизировать человеческий фактор, на базе программы Microsoft Excel создан автоматизированный расчет, в котором учтены вид рельсов и температура их закрепления, эпюра шпал, количество шпал с отступлениями плеча балластной призмы, амплитуда и длина рихтовки, а также план участка, на котором отступления были обнаружены.

Таблица 1

Зависимость поправочного коэффициента K_1 от плана участка

| Длина неровности, м | Радиус кривой 2000 м | | | | | Прямой участок | | | | |
|------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | Стрела изгиба, мм | | | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 4 | 0,646 | 0,517 | 0,452 | 0,415 | 0,379 | 0,543 | 0,424 | 0,394 | 0,330 | 0,304 |
| 5 | 0,646 | 0,503 | 0,432 | 0,396 | 0,369 | 0,540 | 0,411 | 0,353 | 0,321 | 0,295 |
| 6 | 0,668 | 0,499 | 0,434 | 0,388 | 0,360 | 0,552 | 0,413 | 0,350 | 0,315 | 0,287 |
| 7 | 0,669 | 0,511 | 0,432 | 0,388 | 0,351 | 0,575 | 0,426 | 0,356 | 0,315 | 0,278 |
| 8 | 0,711 | 0,534 | 0,452 | 0,393 | 0,351 | 0,613 | 0,448 | 0,367 | 0,322 | 0,278 |
| 9 | 0,743 | 0,559 | 0,465 | 0,407 | 0,351 | 0,659 | 0,478 | 0,389 | 0,335 | 0,287 |
| 10 | 0,788 | 0,595 | 0,493 | 0,428 | 0,355 | 0,717 | 0,517 | 0,418 | 0,357 | 0,291 |
| 11 | 0,832 | 0,646 | 0,527 | 0,455 | 0,370 | 0,780 | 0,565 | 0,452 | 0,385 | 0,305 |
| 12 | 0,881 | 0,689 | 0,564 | 0,487 | 0,392 | 0,851 | 0,615 | 0,493 | 0,417 | 0,330 |
| 15 | 1,000 | 0,809 | 0,682 | 0,411 | 0,480 | 1,000 | 0,785 | 0,634 | 0,538 | 0,417 |
| 20 | 1,000 | 1,000 | 0,865 | 0,771 | 0,638 | 1,000 | 1,000 | 0,853 | 0,741 | 0,590 |
| 30 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,923 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,933 |

Таблица 2

Снижение критических усилий в рельсовых плетях в зависимости от плана линии и количества шпал с отсутствием плеча балластной призмы на длине рихтовки (значение коэффициента K_2)

| Количество шпал с отсутствием плеча балластной призмы | Снижение критической температуры, % | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| | Радиус кривой, мм | | | | | | | Прямой участок |
| | 250 | 300 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 2000 | |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 7,19 | 6,12 | 6,07 | 6,47 | 6,31 | 7,20 | 7,26 | 6,70 |
| 5 | 12,73 | 11,40 | 12,19 | 12,25 | 12,45 | 12,41 | 13,11 | 11,46 |
| 7 | 16,83 | 15,67 | 16,62 | 16,75 | 16,78 | 16,38 | 15,57 | 14,56 |
| 9 | 19,80 | 19,66 | 20,29 | 19,70 | 19,65 | 18,06 | 16,68 | 12,71 |
| 11 | 22,20 | 21,75 | 22,46 | 21,63 | 19,86 | 18,88 | 16,28 | 11,34 |
| 15 | 27,29 | 25,72 | 24,96 | 22,15 | 18,82 | 15,86 | 12,43 | 11,22 |
| 19 | 27,29 | 26,18 | 25,33 | 20,34 | 15,69 | 14,15 | 14,79 | 14,25 |
| 25 | 27,29 | 26,87 | 25,33 | 16,51 | 18,61 | 17,17 | 15,80 | 9,43 |

Результаты расчетов и ранжирование наиболее опасных вариантов приведены в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, для повышения устойчивости бесстыкового пути необходимо принять меры по устранению отступлений амплитудой 20 мм на длине 9 м, а также 10 мм на длине 11 м и 5 мм на длине 4 м.

Наибольшее повышение средней температуры рельсов на перегоне по сравнению с температурой их закрепления в данном случае выявлено по расчету с учетом фактического состояния железнодорожного пути (кроме варианта 3, см. табл. 3). Именно поэтому результаты по данной методике принимаются как наиболее опасный вариант.

Таблица 3

Ранжирование вариантов расчета

| № п/п | Амплитуда отступления, мм | Длина отступления, м | Аппроксимация параболой, $\times 10^6 \text{ с}$ | | Фактическое состояние $[\Delta t_y]_{\text{факт}} - \Delta t, ^\circ \text{C}$ | Формула Эйлера $[\Delta t_y] - \Delta t, ^\circ \text{C}$ | Закон Гука $[\Delta t_y] - \Delta t, ^\circ \text{C}$ | Наиболее опасный вариант |
|-------|---------------------------|----------------------|--|---------------------------------------|---|--|--|--------------------------|
| | | | Скорость изменения рихтовки по длине | Ускорение изменения рихтовки по длине | | | | |
| 1 | 20,00 | 9,00 | 8,9 | -1,98 | 11,7 | 46,99 | 54,00 | 11,7 |
| 2 | 10,00 | 11,00 | 3,6 | -0,66 | 16,47 | 49,40 | 54,00 | 16,47 |
| 3 | 5,00 | 4,00 | 5,0 | -2,50 | 30,98 | 18,36 | 54,00 | 18,36 |
| 4 | 15,00 | 15,00 | 4,0 | -0,53 | 19,94 | 51,61 | 53,99 | 19,94 |
| 5 | 7,00 | 10,00 | 2,8 | -0,65 | 23,4 | 48,43 | 54,00 | 23,4 |
| 6 | 20,00 | 20,00 | 4,0 | -0,40 | 25,33 | 52,76 | 53,99 | 25,33 |
| 7 | 11,00 | 16,00 | 2,8 | -0,34 | 27,29 | 51,99 | 53,99 | 27,29 |
| 8 | 10,00 | 15,00 | 2,7 | -0,36 | 27,5 | 51,99 | 53,99 | 27,5 |
| 9 | 15,00 | 20,00 | 3,0 | -0,30 | 30,98 | 52,83 | 53,99 | 30,98 |
| 10 | 30,00 | 30,00 | 4,0 | -0,27 | 35,01 | 53,65 | 53,99 | 35,01 |
| 11 | 5,00 | 30,00 | 0,7 | -0,04 | 38,38 | 55,09 | 53,99 | 38,38 |

Примечание. Скорость определена для точки В с координатами $-\frac{l}{2}$; 0 (см. рис. 1).

Литература

1. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. М. : Высшая школа, 2009. 559 с.
2. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
3. Овчинников Д. В. Определение запаса устойчивости бесстыкового пути с учетом его фактического текущего состояния : дис. ... канд. техн. наук. Самара : СамГУПС, 2014. 144 с.
4. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 29.12.2012 г. № 2788р. М., 2012.

References

1. Alexandrov A. V., Potapov V. D., Derzhavin B. P. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. M. : Vysshaya shkola, 2009. 559 s.
2. Shakhunyants G. M. Zheleznodorozhnyy put : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Railway : textbook]. M. : Transport, 1987. 479 s.
3. Ovchinnikov D. V. Opredelenie zapasa ustoychivosti besстыkovogo puti s uchetoм ego fakticheskogo tekushchego sostoyaniya : dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of the stability margin of a weldless path, taking into account its actual current : PhD in Engineering Thesis]. Samara : SamGUPS, 2014. 144 s.
4. Instruktziya po ustroystvu, ukladke, sodержaniyu i remontu besстыkovogo puti [Instructions for the installation, laying, maintenance and repair of the weldless path] : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» 29.12.2012 g. № 2788r. M., 2012.

УДК 629.423.3

Алексей Владимирович Владыкин, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Олегович Фролов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЯГОВОГО ПРИВОДА КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Alexey Vladimirovich Vladyskin, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Olegovich Frolov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Optimizing the traction drive as a way to reduce capital investment and operating costs

Аннотация

Снижение энергопотребления подвижного состава остается одной из самых актуальных задач транспорта, решить которую можно при помощи системного подхода к учету необходимого и достаточного объема факторов. В статье на основе анализа стратегических документов, определяющих развитие рельсового транспорта, ставится задача по оптимизации энергопотребления подвижной единицы и проведению мероприятий, которые позволят выводить в эксплуатацию оптимизированные единицы транспорта на участке обращения, отличающиеся пониженным энергопотреблением.

Ключевые слова: метрополитен, пассажиропоток, электропоезд, энергопотребление, эксплуатационные расходы, жизненный цикл.

Summary

Reducing the energy consumption of the rolling stock remains one of the most pressing tasks of transport, which can be solved through a systematic approach to taking into account the necessary and sufficient volume of factors. In the article, based on the analysis of strategic documents that determine the development of rail transport, the task is to optimize the energy consumption of the mobile unit and carry out activities that will allow the commissioning of optimized units of transport in the area of circulation which are characterized by reduced energy consumption.

Keywords: subway, passenger traffic, electric train, energy consumption, operating costs, life cycle.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-72-74

Приоритетные направления, разработанные Минтрансом России, определяют пути инновационного развития каждого из видов рельсового транспорта общего пользования. В настоящее время доля рельсового транспорта в объеме годового пассажиропотока, приходящегося на транспорт общего пользования, имеет тенденцию к росту и составляет более 40 % [1]. Опираясь на стратегию развития до 2030 г. [2], ОАО «РЖД» и обособленные предприятия метрополитена разрабатывают и корректируют собственные стратегии, но при этом не обмениваются накопленным опытом, что выражается в отсутствии сотрудничества между ними.

Крупные структурные преобразования системной направленности, происходящие на железнодорожном транспорте в соответствии со стратегией развития до 2015 г. [1] и далее до 2030 г. [2], означают, что компания «РЖД» ставит перед собой задачу по сокращению издержек и оптимизации своей деятельности, преследуя главным образом экономические, социальные, политические и военно-стратегические цели национального масштаба.

С учетом стратегии до 2030 г. [2] максимальный вариант развития предполагает инновационный сценарий достижения результатов, должен рассматриваться как основной и ориентироваться на научно-технологическое направление и повышение качества услуг.

Объемные показатели работы железнодорожного транспорта при любом из сценариев развития планируются положительными и к 2030 г. должны превысить в 1,46–1,58 раза по грузообороту и 1,16–1,33 раза по пассажирообороту соответствующие значения 2007 г. [2]. Заинтересованность компании ОАО «РЖД» в скорейшем выходе на уровень запланированных показателей проявляется в расширении мероприятий, направленных на достижение намеченных результатов. Что касается подвижного состава, то к числу приоритетных путей развития

относится разработка подвижной единицы с минимизацией затрат за жизненный цикл эксплуатации [2]. Рост эффективности и снижение энергопотребления тягового подвижного состава как наиболее крупной единицы потребления электроэнергии становятся возможными по мере развития инструментов проектирования и приближения «функции цели» к минимальному значению [3]. Тем самым перед проектными институтами и ведущими компаниями, производящими подвижной состав, ставится научно-техническая задача снизить удельные показатели энергопотребления на тягу поездов на 10–15 %.

Рост эффективности подвижного состава с одновременным повышением качества и безопасности транспортных услуг может быть достигнут на основе комплексной оптимизации подвижной единицы с первоначальным разделением на нетяговую и тяговую и последующей их систематизацией. Такой способ непременно приведет к снижению единовременных капитальных вложений, а также эксплуатационных расходов в период жизненного цикла продукта.

Оптимизация как инструмент достижения цели при проектировании несамоходной единицы используется при поиске решений по снижению массы тары вагона за счет активного и уместного применения композитных материалов и легких металлов и, кроме того, при поиске решений в области эргономичного размещения объекта перевозки. Это позволит сократить эксплуатационный парк на 20 % при равном объеме перевозок, повысить производительность вагона в пределах 9 %, увеличить удельный показатель энергопотребления до 5 %, снизить число локомотивов до 10 % и локомотивных бригад — до 20 % [2]. При рассмотрении самоходных единиц подвижного состава помимо перечисленной выше области задач возникает еще одна — совершенствование тяговых свойств.

Предприятия городского транспорта, особенно метрополитена, также должны следовать стратегии развития [2] и опираться на опыт смежных организаций, модернизируя подвижной состав в зависимости от конкретных условий эксплуатации и объема перевозочной работы.

На сегодняшний день большая часть компаний, на балансе которых находится рельсовый транспорт, имеет в своем распоряжении подвижной состав с коллекторным приводом, требующим повышенного ухода в период жизненного цикла и соответствующих эксплуатационных расходов. В среднем на этих предприятиях показатель энергопотребления приводом составляет около 41 % от общего потребления электроэнергии при тяговом приводе коллекторного типа в пассажирском движении. Этот показатель может быть снижен за счет предварительной оптимизации привода под конкретный участок эксплуатации.

На участке обращения Екатеринбургского метрополитена уровень потребления электроэнергии поездом имеет положи-

тельную динамику роста и составляет около 50 тыс. кВт·ч, что соответствует примерно 13 млн перевезенных пассажиров. В результате статистического расчета зависимость между, казалось бы, прямо коррелирующими показателями оказалась невысокой. Уровень в 61 % в таком случае может говорить и о недогруженности подвижного состава, и соответственно о неэффективном его использовании [4].

Эксплуатация подвижного состава с уже типовым асинхронным тяговым приводом, в который входят частотный преобразователь, асинхронный двигатель и редуктор, по сравнению с коллекторным приводом, несомненно, помогает снизить энергопотребление, долю в общих расходах на электроэнергию, а также уровень эксплуатационных расходов на обслуживание привода. Но тем не менее и при использовании асинхронного привода задача достижения еще более низкого уровня потребления электроэнергии без увеличения эксплуатационных расходов по-прежнему остается актуальной.

Применение одного типа привода на большом количестве участков эксплуатации явным образом дает понять, что из-за различных конфигураций участков привод может быть как недоиспользован, так и приближаться к граничным или бустерным условиям эксплуатации. В свою очередь, это ведет к повышенному энергопотреблению всех его элементов из-за работы в режиме, далеком от номинального [5, 6]. Унификация любого тягового привода с точки зрения применимости, несомненно, станет причиной повышенного уровня энергопотребления и, как следствие, растущей доли в общих эксплуатационных затратах оператора. Кроме того, недоиспользование мощностей на некоторых участках приводит к постоянно неиспользуемым резервам привода, которые могут быть «изъяты» заводом-изготовителем. Гибкая система проектирования, позволяющая оптимизировать привод под любой участок эксплуатации, позволит убрать имеющиеся резервы мощности и спроектировать привод на эксплуатацию в большей степени в номинальном режиме работы. В результате возможен переход на более низкий класс основных элементов инвертора, что сопряжено с соответствующим снижением материальной базы двигателя. Это позволит снизить стоимость продукта и тем самым сократить капитальные вложения заказчика.

Таким образом, несмотря на то что при оптимизации всегда встают вопросы о том, какие критерии выбирать в качестве основных и как быть, если этих критериев много, экономический эффект, достигаемый в результате проделанной работы, положителен для всех сторон рынка. Как правило, приведение ряда критериев в условиях одной задачи к функции качества с последующей минимизацией систематизирует процесс [5, 6]. В результате полученная конструкция будет идеальной или оптимизированной с точки зрения выбранного ряда критериев и участка обращения [2].

Литература

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД») [Электронный ресурс]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (дата обращения: 05.04.2017).
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.08 г. № 877-р [Электронный ресурс]. URL: http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/strategiya_razvitiya_zheleznodorozhnogo_transporta_v_rossiyskoy_federacii_do_2030_goda.pdf (дата обращения: 05.04.2017).
3. Шелюфаст В. В. Основы проектирования машин. М. : Изд-во АПМ, 2005. 472 с.
4. Владыкин А. В., Фролов Н. О. Определение эффективности эксплуатационной деятельности метро с точки зрения энергопотребления тяговым подвижным составом // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-61-63. ISSN 1815-9400.
5. Владыкин А. В., Фролов Н. О. Математическое моделирование влияния высших гармоник на поведение асинхронного тягового привода магистрального электровоза в системе Matlab/Simulink // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-86-90. ISSN 1815-9400.
6. Владыкин А. В., Фролов Н. О. К вопросу о математическом моделировании влияния импульсного инвертора на процессы боксования колесной пары в предельных условиях эксплуатации // Инновационный транспорт. 2015. № 2 (16). С. 36–37. ISSN 2311-164X.

References

1. Strategiya innovatsionnogo razvitiya ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda (Belaya kniga ОАО «RZhD») [The strategy of innovation development of JSC Russian Railways for the period until 2015 (White Book of JSC Russian Railways)]. [Electronic resource]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (access date: 05.04.2017).
2. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda : rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 17.06.08 g. № 877-r [Strategy for the development of rail transport in the Russian Federation until 2030 : Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.08 № 877-r]. [Electronic resource]. URL: http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/strategiya_razvitiya_zheleznodorozhnogo_transporta_v_rossiyskoy_federacii_do_2030_goda.pdf (access date: 05.04.2017).
3. Shelofast V. V. Osnovy proektirovaniya mashin [Basics of designing machines]. M. : Izd-vo APM, 2005. 472 s.
4. Vladikin A. V., Frolov N. O. Opredelenie effektivnosti ekspluatatsionnoy deyatel'nosti metro s tochki zreniya energopotrebleniya tyagovym podvizhnym sostavom [Determination of efficiency of operating activity of the subway from the point of view of energy consumption by driving mobility composition] // Transport Urala. 2017. № 2 (53). S. 61–63. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-61-63. ISSN 1815-9400.
5. Vladikin A. V., Frolov N. O. Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya vysshikh garmonik na povedenie asinkhronnogo tyagovogo privoda magistral'nogo elektrovoza v sisteme Matlab/Simulink [Matlab/Simulink modeling of higher harmonics influence on behavior of asynchronous traction drive of mainline electric locomotive] // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-86-90. ISSN 1815-9400.
6. Vladikin A. V., Frolov N. O. K voprosu o matematicheskom modelirovanii vliyaniya impul'snogo invertora na protsessy boksovaniya kolesnoy pary v predel'nykh usloviyakh ekspluatatsii [The issue of mathematical modeling of the impact of pulse inverter on wheelset spinning processes in extreme operating conditions] // Innovatsionnyy transport. 2015. № 2 (16). S. 36–37. ISSN 2311-164X.

УДК 621.311

Василий Титович Черемисин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Владислав Леонидович Незевак, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Виктор Владимирович Эрбес, кандидат технических наук, инженер-проектировщик научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ОЦЕНКА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА СТОРОНЕ ВЫШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В АСПЕКТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Vasily Titovich Cheremisin, DSc in Engineering, Professor, Head of the Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Vladislav Leonidovich Nezevak, PhD in Engineering, Senior Researcher, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Viktor Vladimirovich Erbes, PhD in Engineering, Engineer-Designer, Research and Production Laboratory «Energy-saving Technologies and Electromagnetic Compatibility», Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Evaluating of voltage regulation on the side of high voltage of traction substation in aspect energy efficiency

Аннотация

В статье исследуются возможности регулирования напряжения в системе тягового электроснабжения для повышения энергетической эффективности перевозочного процесса. Рассмотрены основные подходы к оценке влияния регулирования напряжения в тяговой сети на потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Представлены данные измерений тяговой нагрузки и напряжения на шинах высшего и низшего напряжений тяговой подстанции. Приведены результаты оценки влияния напряжения на шинах высшего напряжения тяговых подстанций на уровень технических потерь в тяговой сети, полученные на основе имитационного моделирования для суточного графика нагрузки.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая сеть, электроподвижной состав, энергетическая эффективность, потери электроэнергии, напряжение на шинах, понижающий трансформатор.

Summary

The article considers approaches to voltage regulation in traction power supply system in the aspect of energy efficiency of the transportation process. The main approaches to the estimation of the effect of voltage regulation in the traction network on the losses of electric power in the traction power supply system are considered. The results of measurements of the tractive load and voltage on the tires of the higher and lower voltages of the traction substation are presented. The results of the evaluation of the influence of the voltage level on the tires of the higher voltage of the traction substations on the level of technical losses in the traction network, obtained on the basis of simulation modeling for the daily load profile, are shown.

Keywords: traction power supply system, traction network, electric rolling stock, energy efficiency, electric energy loss, voltage on the tires, step-down transformer.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-75-81

Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения — одно из важнейших направлений, установленных Энергетической стратегией холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. [1]. Энергетическая эффективность перевозочного процесса связана с рядом влияющих факторов, в том числе с режимами тяговой нагрузки и напряжения. При регулировании напряжения в системе тягового электроснабжения (СТЭ) изменяются потери холостого хода и нагрузочные потери в понижающих и преобразовательных трансформаторах, выпрямительных агрегатах, потери электроэнергии в тяговой сети, уровень удельного расхода электроэнергии и рекуперации и коэффициент полезного действия электроподвижного состава (ЭПС).

Уровень напряжения на шинах тяговой подстанции (ТП) определяется, во-первых, напряжением в системе внешнего электроснабжения, во-вторых, уровнем нагрузки ТП. Напряжение в системе внешнего электроснабжения зависит от ряда факторов, в том числе от графика нагрузки и режима работы электрических станций. Как правило, нагрузка большей части потребителей в энергосистеме в ночной период падает. Исключение составляют потребители, работающие круглосуточно, в частности железнодорожный транспорт. Тяговая нагрузка, в свою очередь, определяется рядом эксплуатационных показателей и для каждой ТП имеет свои особенности.

Рассмотрим в качестве примера две ТП переменного тока с различным характером тяговой нагрузки. Согласно результатам измерений, выполненных в течение нескольких суток, на тяговой подстанции А увеличение нагрузки наблюдается в ночной (рис. 1а), а на тяговой подстанции Б — в дневной период (рис. 1б). Измерение напряжения на шинах 27,5 кВ показывает, что при пиковых тяговых нагрузках оно снижается до уровня 24,4 кВ, а его среднее значение составляет 26,0–27,0 кВ (рис. 2). Из этого следует, что регулирование напряжения в тяговой сети должно осуществляться с учетом изменения напряжения в системе внешнего электроснабжения, и с учетом уровня нагрузки ТП.

Влияние факторов на уровень напряжения на токоприемнике ЭПС рассмотрим на примере СТЭ переменного тока 27,5 кВ (рис. 3). Факторы можно разделить на две группы: случайные, т.е. уровень напряжения на шинах высшего напряжения (ВН), нетяговая нагрузка, тяговая нагрузка, рекуперация на межподстанционных зонах, и регулируемые — положение устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) понижающего трансформатора, состояние схемы питания и секционирования контактной сети, средства компенсации реактивной мощности (КУ) на ТП и посту секционирования (ПС). На схеме (см. рис. 3) обозначены основные элементы СТЭ — места возникновения потерь напряжения и мощности (ΔP). Одними из основных рассматриваемых факторов являются уровень напряжения на шинах ВН 1 и удаленность ТП от питающего центра энергосистемы. Уровень напряжения на шинах низкого напряжения (НН) 4 можно регулировать изменением положения РПН понижающего трансформатора 2. Потери холостого хода и нагрузочные потери понижающего трансформатора изменяются от уровня напряжения и нагрузки нетяговых потребителей 3, тяговой нагрузки ЭПС 8, нетяговой нагрузки 12, подключенной к шинам НН, и уровня напряжения на шинах ВН. Изменение нетяговой нагрузки также влияет на уровень напряжения на шинах НН. В случае необходимости дополнительного регулирования напряжения на шинах НН тяговой подстанции или поста секционирования используются КУ. Под цифрами 5 и 10 на рис. 3 обозначены сопротивления контактной подвески и рельса, определяющие потери напряжения на токоприемнике и потери мощности в контактной подвеске и рельсе. В зависимости от интенсивности движения поездов выбирается место расположения ПС и пунктов параллельного соединения (ППС) в схеме питания и секционирования тяговой сети. Изменение схемы определяется состоянием секционных разъединителей, ППС 6 и ПС 7. В случае повышенной интенсивности движения поездов по участку на ПС устанавливаются КУ, которые позволяют поддерживать напряжение на токоприемнике в требуемом диапазоне [2–4]. Значительное влияние на изменение уровня напряжения в контактной сети оказывают режим работы ЭПС 8 и удаленность его от ТП, а также рекуперативное торможение ЭПС 11. При отсутствии согласования регулирования напряжения в контактной сети и применения рекуперативного торможения возникают ситуации, когда напряжение на токоприемнике 9 превышает допустимое значение [5]. Таким образом, можно утверждать, что для поддержания оптимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС требуется согласование систем внешнего и тягового электроснабжения, как описано в [6, 7].

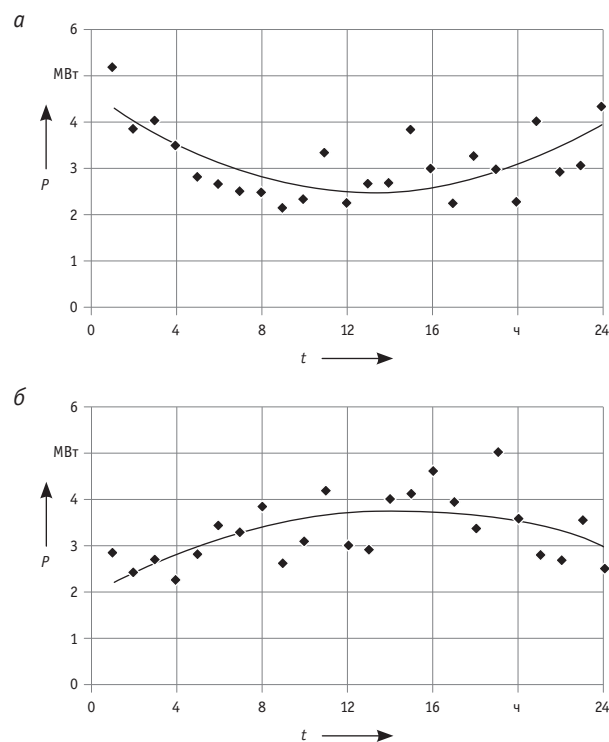


Рис. 1. Тяговая нагрузка:

а — на тяговой подстанции А; б — на тяговой подстанции Б

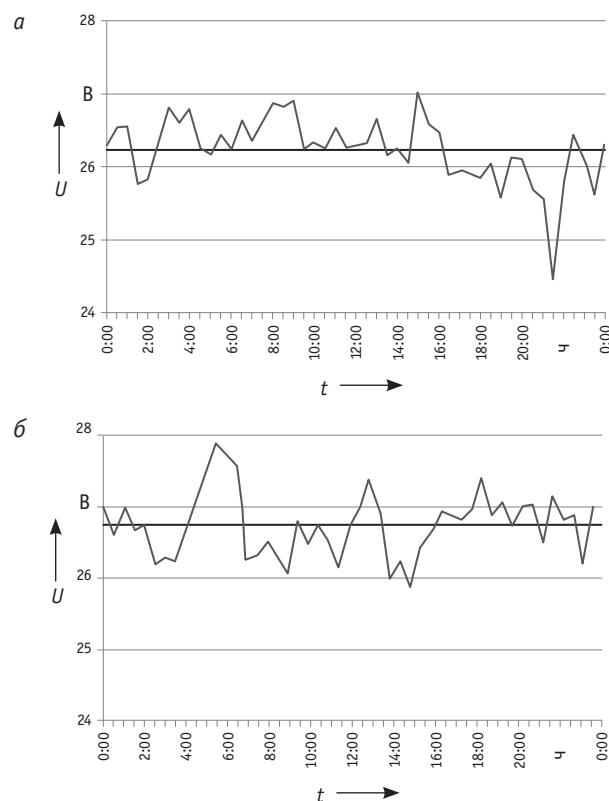


Рис. 2. Напряжение на шинах 27,5 кВ:

а — тяговая подстанция А; б — тяговая подстанция Б



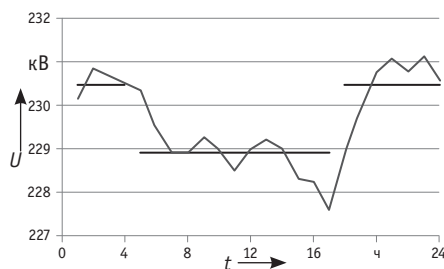


Рис. 4. Напряжение в дневной и ночной периоды на шинах ВН тяговой подстанции переменного тока

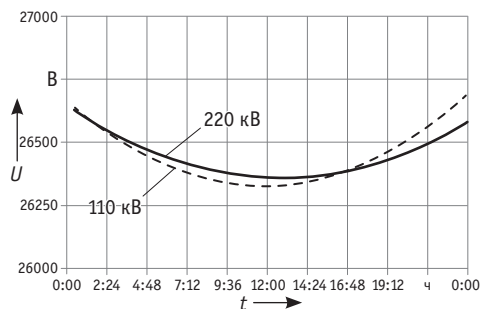


Рис. 5. Изменение напряжения на шинах 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока

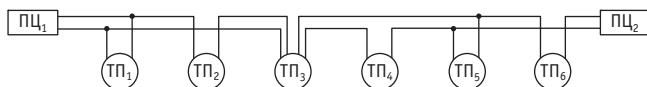


Рис. 6. Двусторонняя схема питания ТП

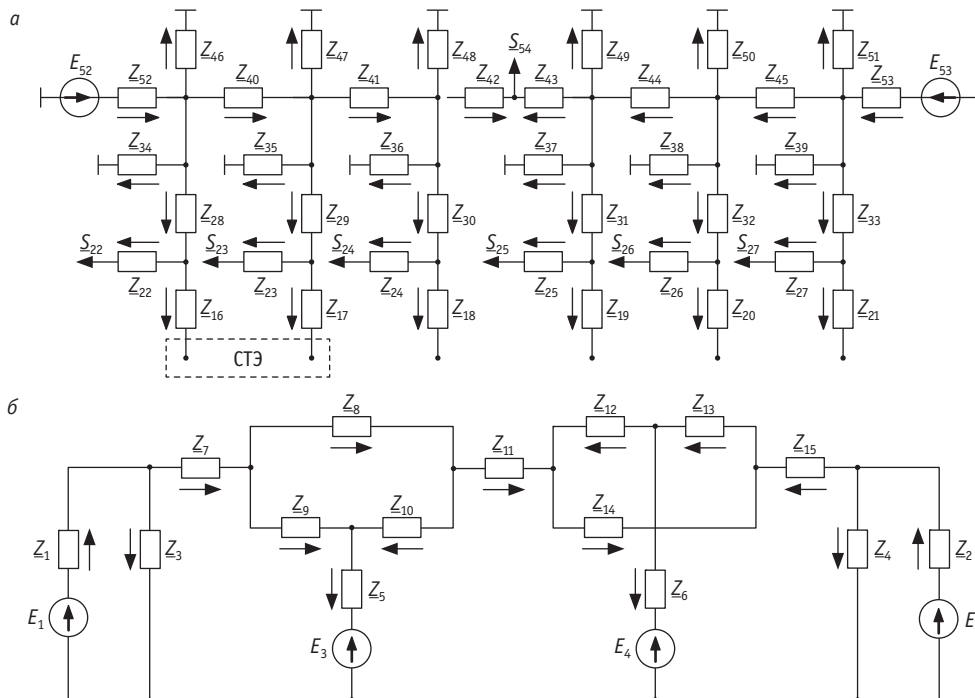


Рис. 7. Схемы замещения:

а — система внешнего электроснабжения и тяговые трансформаторы с районной нагрузкой; б — СТЭ

На рис. 7 представлены элементы схем замещения: Z_1, Z_2 — входное сопротивление тяговой сети; Z_3, Z_4 — поперечное сопротивление двухпутного участка; Z_5, Z_6 — сопротивление электротяговой нагрузки; Z_7-Z_{15} — продольное сопротивление участков тяговой сети; $Z_{16}-Z_{21}$ — сопротивление луча звезды понижающего трансформатора со стороны НН; $Z_{22}-Z_{27}$ — сопротивление луча звезды понижающего трансформатора со стороны среднего напряжения (СН); $Z_{28}-Z_{33}$ — сопротивление луча звезды понижающего трансформатора со стороны ВН; $Z_{34}-Z_{39}$ — сопротивление намагничивания понижающего трансформатора; $Z_{40}-Z_{45}$ — продольное сопротивление участков ЛЭП; $Z_{46}-Z_{51}$ — поперечное сопротивление участков ЛЭП; $Z_{52}-Z_{53}$ — входное сопротивление питающих центров; E_1, E_2 — напряжение на шинах ТП; E_3, E_4 — напряжение на токоприемнике ЭПС в режиме рекуперации; $S_{22}-S_{27}$ — районная нагрузка тяговых трансформаторов; S_{54} — промышленная нагрузка от питающих ЛЭП.

На железнодорожном транспорте применяется управление режимами питания межподстанционных зон с целью сокращения потерь электроэнергии. При этом изменение режимов питания в условиях существенного снижения объема работы в ночное время допустимо для одних участков железных дорог, но не подходит для участков, работающих с практически неизменным по времени суток грузопотоком. Такие решения нашли применение на Калининградской и Московской кольцевой железных дорогах, где в период спада перевозок могут отключаться одна из ТП, понижаться напряжение на стороне ВН группы ТП или изменяться режим питания межподстанционных зон. Для реализации указанных условий с помощью

программного обеспечения было выполнено имитационное моделирование электрических величин электроэнергетической системы, представленной на рис. 7. Описание работы программного обеспечения дано в [10, 11]. Рассматриваемая система внешнего электроснабжения представляет собой одноцепную ЛЭП с двусторонним питанием и длиной участков между ТП в 50 км, выполненную проводом АС 300/39. Шесть тяговых подстанций СТЭ оборудованы одинаковыми трехобмоточными тяговыми трансформаторами типа ТДТНЭ 40000/220 с номинальным напряжением обмоток 230/275/6 кВ. Напряжение на стороне ВН при моделировании принято повышенным в ночной период времени. Из рис. 8 видно, что при снижении напряжения на стороне ВН потери электроэнергии в тяговой сети возрастают. Для рассматриваемого примера при напряжении 231,1 кВ потери электроэнергии в тяговой сети составляют 6,75 %, а при понижении напряжения до уровня 227,6 кВ — 7,44 % от распределенной электроэнергии на тягу. Потери электроэнергии в понижающих трансформаторах при снижении напряжения с 231,1 до 227,6 кВ увеличиваются незначительно, в рассматриваемом случае — с 1219 до 1272 кВт·ч, или с 0,94 до 0,97 %. Ориентировочные расчеты позволяют оценить эффект регулирования напряжения: в частности, для рассматриваемого участка переменного тока снижение уровня напряжения на шинах ВН тяговой подстанции на 1 % приводит к увеличению потерь электроэнергии в тяговой сети на 0,45 %, а в понижающих трансформаторах — на 0,03 %.

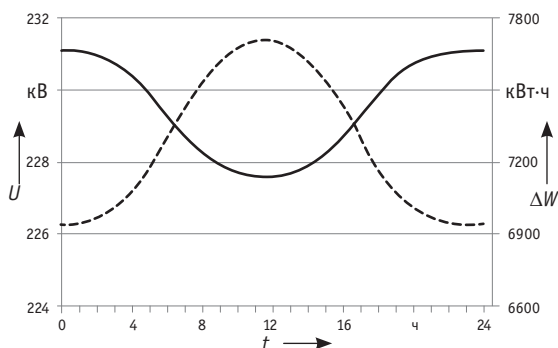


Рис. 8. Изменение потерь электроэнергии в тяговой сети от напряжения на стороне ВН в течение суток (мощность нагрузки в межподстанционной зоне 8000 кВт):
—— — напряжение на стороне ВН; ---- — потери в тяговой сети

Рассмотрим другой вариант изменения напряжения на шинах ВН тяговой подстанции: в часы минимальных размеров движения напряжение снижается (как это характерно для условий Московской кольцевой железной дороги). Электротяговая нагрузка в ночной период отсутствует, а в дневной нагрузка в МПЗ принята 8000 кВт. В исследовании выполнено два варианта моделирования: без регулирования напряжения на стороне ВН в ночной период и с регулированием напряжения на величину ступени РПН. В результате установлено, что регулирование напряжения не приводит к снижению потерь электроэнергии в тяговой сети, а лишь незначительно сокращает их в тяговых трансформаторах — с 20153 до 19994 кВт·ч/сут, или с 1,07 до 1,06 % от распределенной электроэнергии.

Выполненное исследование позволяет сделать вывод, что уровень потерь электроэнергии в СТЭ можно снизить за счет регулирования напряжения на стороне ВН, например, в дневной период, когда промышленная нагрузка достигает максимальных значений и наблюдается пониженное напряжение на стороне ВН. Результаты имитационного моделирования регулирования напряжения на стороне ВН тяговой подстанции (см. рис. 7) для условий пропуска 30 пар поездов в сутки с унифицированной массой от 4 до 6 тыс. т на двухпутном участке позволяют оценить сокращение потерь электроэнергии. Для указанных условий снижение потерь электроэнергии для участка протяженностью 300 км ориентировочно составит около 3,0 млн кВт·ч/год, или 0,3 % от расхода на тягу.

В настоящее время напряжение в тяговой сети является одним из нерасчетных факторов, влияние которого при анализе электропотребления и его составляющих (небаланс, рекуперация) на электрифицированных участках железнодорожного транспорта не учитывается. Это объясняется отсутствием методики оценки энергетической эффективности регулирования напряжения в тяговой сети. В то же время изменение напряжения на токоприемнике ЭПС, особенно в условиях организации тяжеловесного движения и применения рекуперативного торможения [12], оказывает влияние на тяговые характеристики и мощность, потребляемую ЭПС из контактной сети.

Для разработки методики по оценке влияния напряжения на энергетическую эффективность перевозочного процесса требуется исследовать характер изменения потерь электроэнергии во всех элементах СТЭ при изменении напряжения, в том числе и в ЭПС. Рассмотрим основные положения этой методики.

В общем виде электропотребление на тягу, включающее в себя технические потери и энергию рекуперации, для определенной конфигурации СТЭ зависит от трех основных факторов — напряжения на шинах подстанции ($U_{ш \text{ ЭЧЭ}}$), напряжения на токоприемнике ЭПС ($U_{ткп}$) и тока электровоза $I_{эл}$:

$$W_{\text{ЭЧЭ}} = f(U_{ш \text{ ЭЧЭ}}, U_{ткп}, I_{эл}). \quad (1)$$

Уровень напряжения на шинах подстанции определяет уровень потерь холостого хода понижающих и преобразовательных трансформаторов и нагрузочные потери в них, а также условия применения рекуперативного торможения и технические потери в тяговой сети.

Изменение напряжения на токоприемнике приводит к изменению тяговых характеристик ЭПС [13–15]. В тяговых расчетах в данных случаях используется корректировка [16]. Так, при изменении напряжения на токоприемнике перестраивается тяговая характеристика и корректируются токовые характеристики электроподвижного состава через перерасчет скорости движения поезда:

$$V' = V \cdot \frac{U'_{ткп}}{U_{ткп}}, \quad (2)$$

где $U'_{ткп}$ — скорректированное значение напряжения на токоприемнике ЭПС.

Снижение скорости движения при понижении напряжения приводит к увеличению времени хода ЭПС под током и росту тока, потребляемого ЭПС. Это обстоятельство обуславливает увеличение электропотребления на тягу и нагрузочных потерь. Кроме того, возрастают потери напряжения в тяговой сети.

С другой стороны, увеличение напряжения на шинах ТП ухудшает условия применения рекуперативного торможения и увеличивает потери холостого хода.

Из этого следует, что разрабатываемая методика должна включать в себя порядок расчета электропотребления с учетом потерь электроэнергии во всех элементах СТЭ, в том числе и в ЭПС, в различных режимах работы и содержать следующие основные этапы:

порядок сбора и обработки измерений напряжения и нагрузки на шинах ТП на участках железных дорог;

подготовку данных для оценки влияния напряжения, включая технические характеристики СТЭ (режим питания межподстанционных зон, тяговая сеть, параметры тяговой сети, ТП и линейных устройств, в том числе устройств регулирования напряжения и др.) и ЭПС (серии локомотивов, массы составов, объем выполняемой работы, доля порожнего пробега, объемы рекуперации и др.) и данные информационных систем об эксплуатационных показателях;

оценку влияния изменения напряжения на потери холостого хода и нагрузочные потери на ТП и линейных устройствах; оценку влияния изменения напряжения на потери электроэнергии в тяговой сети;

оценку влияния изменения напряжения на потери электроэнергии в ЭПС;

оценку влияния изменения напряжения на суммарный уровень потерь электроэнергии.

Разрабатываемая методика должна учитывать уровень напряжения на шинах ВН и НН, уровень нагрузки подстанции и выполнять оценку мероприятий по регулированию напряжения на шинах ТП с учетом изменения тяговой нагрузки в течение суток по уровню энергоэффективности.

Таким образом, регулирование напряжения на шинах ВН тяговой подстанции способствует повышению энергетической эффективности. Предварительные расчеты, выполненные для участков переменного тока, показывают, что понижение напряжения на шинах ВН ТП на 1% приводит к увеличению потерь в СТЭ на 0,4%. Предложенный порядок позволяет сформировать единый подход к оценке влияния уровня напряжения на шинах ТП на потери электроэнергии в СТЭ постоянного и переменного тока в рамках разрабатываемой методики.

Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р [Электронный ресурс]. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 12.04.2017).
2. Герман Л. А., Кишкурно К. В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // Электричество. 2014. № 9. С. 23–34. ISSN 0013-5380.
3. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 10. С. 54–64. ISSN 1684-8519.
4. Никонов А. В. Эффективность регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности электрифицированных железных дорог // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : матер. второй всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 241–248.
5. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. С. Вильгельм, В. А. Кващук // Локомотив. 2013. № 8. С. 7–10. ISSN 0869-8147.
6. Никифоров М. М., Кондратьев Ю. В., Каштанов А. Л. Влияние условий сопряжения систем внешнего и тягового электроснабжения на уровень потерь электроэнергии в тяговой сети // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : матер. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Т. 1. Красноярск : Изд-во «Гротеск», 2005. С. 101–104.
7. Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Норкин И. Ю. Повышение эффективности контроля электропотребления на тягу поездов и нетяговые нужды по данным АСКУЭ : моногр. Омск, 2010. 118 с.

References

1. Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda : utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 14.12.2016 g. № 2537r [The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 : approved by the order of JSC Russian Railways of Dec 14, 2016 No. 2537r]. [Electronic resource]. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (access date: 12.04.2017).
2. German L. A., Kishkurno K. V. Regulirovanie napryazheniya v tyagovoy seti peremennogo toka zheleznikh dorog [Voltage regulation in traction AC railways] // Elektrichestvo. 2014. № 9. S. 23–34. ISSN 0013-5380.
3. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov seksionirovaniya s nakopitelyami elektricheskoy energii [Increase of energy efficiency of electric traction system in operating condition of sectioning posts with electric energy storage units] // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2015. T. 326. № 10. S. 54–64. ISSN 1684-8519.
4. Nikonov A. V. Effektivnost' reguliruemyykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog [Efficiency of controlling devices for transverse compensation of reactive power of electrified railways] // Pribory i metody izmereniy, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : mater. vtoroy vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem / OmGUPS. Omsk, 2016. S. 241–248.
5. Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na sistemu tyagovogo elektrosnabzheniya [Influence of regenerative braking on traction power supply system] / V. T. Cheremisin, V. L. Nezevak, A. S. Vilgelm, V. A. Kvashchuk // Lokomotiv. 2013. № 8. S. 7–10. ISSN 0869-8147.
6. Nikiforov M. M., Kondrat'yev Yu. V., Kashanov A. L. Vliyanie usloviy sopryazheniya sistem vneshnego i tyagovogo elektrosnabzheniya na uroven' poter' elektroenergii v tyagovoy seti [Influence of conditions of conjugation of external and traction power systems on the level of electric power losses in the traction network] // Resurssoberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte : mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem. T. 1. Krasnoyarsk : Izd-vo «Grotesk», 2005. S. 101–104.
7. Kashanov A. L., Nikiforov M. M., Norkin I. Yu. Povyshenie effektivnosti kontrolya elektropotrebleniya na tyagu poezdov i netyagovye nuzhdy po dannym ASKUE : monogr. [Improving the efficiency of monitoring power consumption for train traction and non-tangled needs according to AMRMS: monograph]. Omsk, 2010. 118 s.

8. Наумкин Р. Б. Оценка исполнения команд на регулирование напряжения // Электроэнергетика глазами молодежи : тр. VI междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина. Иваново, 2015. С. 151–154.
9. Комяков А. А., Эрбес В. В., Незевак В. Л. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 137–143. ISSN 1813-9108.
10. Черемисин В. Т. Потери электрической энергии в тяговой сети при наличии на участке тяговой подстанции с повышенным входным сопротивлением // Тез. докл. науч.-практ. конф. кафедр Ом. ин-та инж. ж.-д. трансп., посвящ. 60-летию ОмИИТа. Омск : Ом. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1990. С. 146.
11. Черемисин В. Т. Совершенствование методов расчета режимов приема и потребления электрической энергии в условиях несимметрии и несинусоидальности электротяговой нагрузки переменного тока : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 1996. 405 с.
12. Istomin S., Nesewak V. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES 10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn // Elektrische Bahnen. 2015. № 4. P. 186–189.
13. Вильгельм А. С., Комяков А. А., Незевак В. Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока // Известия Транссиба. 2014. № 3 (19). С. 54–65. ISSN 2220-4245.
14. Вильгельм А. С., Незевак В. Л. Учет фактора изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава постоянного тока при проведении тяговых расчетов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. № 2 (4). С. 21–25. ISSN 2415-8658.
15. Вильгельм А. С., Незевак В. Л. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16. № 3. С. 32–40. DOI: 10.14529/power160304. ISSN 1990-8512.
16. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 287 с.
8. Naumkin R. B. Otsenka ispolneniya komand na regulirovanie napryazheniya [Evaluation of the execution of commands for voltage regulation] // Elektroenergetika glazami molodezhi : tr. VI mezhdunar. nauch.-tekh. konf. / Ivan. gos. energet. un-t im. V. I. Lenina. Ivanovo, 2015. S. 151–154.
9. Komyakov A. A., Erbes V. V., Nezevak V. L. Otsenka effektivnosti parallelnoy raboty vypryamitel'nykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy na osnove dannykh izmeritel'nykh sistem [Evaluation the effectiveness of parallel operation of traction substation rectifiers based measurement systems] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2015. № 2 (46). S. 137–143. ISSN 1813-9108.
10. Cheremisin V. T. Poteri elektricheskoy energii v tyagovoy seti pri nalichii na uchastke tyagovoy podstantsii s povyshennym vkhodnym soprotivleniem [Loss of electrical energy in the traction network in the presence of a traction substation with an increased input resistance] // Tez. dokl. nauch.-prakt. konf. kafedr Om. in-ta inzh. zh.-d. transp., posvyashch. 60-letiyu OmIITa. Omsk : Om. in-t inzh. zh.-d. transp., 1990. S. 146.
11. Cheremisin V. T. Sovershenstvovanie metodov rascheta rezhimov priema i potrebleniya elektricheskoy energii v usloviyakh nesimmetrii i nesinusoidal'nosti elektrodyagovoy nagruzki peremennogo toka : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Improvement of methods for calculating the modes of reception and consumption of electric energy in conditions of asymmetry and non-sinusoidal electric traction of alternating current : DSc in Engineering Thesis]. Omsk, 1996. 405 s.
12. Istomin S., Nesewak V. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn // Elektrische Bahnen. 2015. № 4. P. 186–189.
13. Vilgelm A. S., Komyakov A. A., Nezevak V. L. Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Improvement in the calculation methods for the traction power system] // Izvestiya Transsiba. 2014. № 3 (19). S. 54–65. ISSN 2220-4245.
14. Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Uchet faktora izmeneniya napryazheniya na tokopriemnike elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka pri provedenii tyagovykh raschetov [Accounting of the voltage change factor on the pantograph of the direct current electric stock when carrying out traction calculations] // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. 2015. № 2 (4). S. 21–25. ISSN 2415-8658.
15. Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Sovershenstvovanie sposoba opredeleniya energeticheskikh pokazateley dvizheniya poezda i sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Improved method for determining energy indicators movement of trains and systems traction power supply] // Vestnik YuUrGU. Ser. Energetika. 2016. T. 16. № 3. S. 32–40. DOI: 10.14529/power160304. ISSN 1990-8512.
16. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty [Traction calculation rules for train activity]. M. : Transport, 1985. 287 s.

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,
Александр Михайлович Неволин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,
Мария Олеговна Мисник, магистрант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВПУСКА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ КАНАЛОВ

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,
Alexander Mikhaylovich Nevolin, 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,
Mariya Olegovna Misnik, graduate student, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

Modernization of the intake pipe configuration of the 21/21 diesel on the basis of numerical modeling

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования газодинамики во впускных системах поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС), имеющих разную конфигурацию. Показано, что использование во впускных трубопроводах профилированных участков с поперечными сечениями в форме квадрата или равнобедренного треугольника существенно изменяет структуру течения вплоть до клапанной щели и цилиндра двигателя, а также способствует стабилизации течения (уменьшению застойных зон). Это приводит к увеличению объемного расхода воздуха (в среднем на 24 %) через систему впуска поршневого ДВС. Таким образом, поперечное профилирование каналов во впускной системе может быть использовано при проектировании для газодинамического совершенствования газозвуковых трактов поршневых двигателей.

Ключевые слова: поршневой двигатель внутреннего сгорания, впускная система, процесс впуска, газодинамика, расходные характеристики, численное моделирование, экспериментальные исследования.

Summary

The results of experimental research and numerical simulation of gas dynamics in the intake systems of different configuration in a car the internal combustion engine is presented. It is shown that the use in the intake system of pipes with profiled sections with cross sections in the shape of a square or an equilateral triangle leads to a significant change in the structure of the flow up to the slit valve and the engine cylinder. It also leads to a stabilization of the flow (reduction of dead zones) and to increase the volumetric flow of air (average 24 %) via the intake system of the piston internal combustion engine. The transverse profiling of the channels in the intake system can be used in the design of the gas-air paths of piston engines with a view to their gas-dynamic improvement.

Keywords: piston internal combustion engine, intake system, intake processes, gas dynamics, flow characteristics, numerical simulation, experimental studies.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-82-86

Известно, что в проточных частях энергетических машин (например, газотурбинных установок или двигателей внутреннего сгорания) могут образовываться застойные зоны и/или обратные течения, которые отрицательно влияют на гидравлическое сопротивление систем и соответственно на их расходные характеристики. В частности, от газодинамического совершенства впускных систем зависит эффективность работы поршневых ДВС [1–3]. Основное направление улучшения показателей качества газообмена состоит в снижении гидравлического сопротивления за счет стабилизации потока, т.е. уменьшения влияния застойных зон на течение газов во впускной системе. Таким образом, газодинамическое совершенствование должно привести к увеличению расхода воздуха через впускную систему двигателя, что позволит сжечь больше топлива и получить более высокие технико-экономические показатели.

Конфигурация (геометрические размеры) элементов впускной системы поршневого ДВС оказывает существенное влияние на газодинамику и теплообмен в процессе впуска [1–5]. Соответственно один из возможных способов совершенствования газодинамических характеристик газовых потоков заключается в использовании трубопроводов с поперечными сечениями, отличными от круглых, например с квадратными или треугольными. В таких каналах возникают устойчивые вихревые структуры, которые стабилизируют течение и препятствуют образованию застойных зон и обратных волн давления [6–8].

В данной работе с помощью численного моделирования и экспериментальных исследований проверялась гипотеза о том, что поперечное профилирование впускного трубопровода

автомобильного двигателя (2Ч 8,2/7,1) может привести к стабилизации течения, уменьшению застойных зон в цилиндре и системе впуска, а следовательно, к повышению расхода воздуха через цилиндры двигателя.

На сегодняшний день численное моделирование в стационарных условиях — это один из самых распространенных и эффективных способов для оценки совершенствования газоздушных систем энергетических машин и установок. В частности, данный метод позволяет предварительно определить варианты модернизации элементов впускной системы поршневого ДВС и дальнейшие направления детального изучения процессов на натурных экспериментальных установках (двигателях) в условиях нестационарности.

Для исследования структуры и теплообмена потока при течении газа в трубах с разными конфигурациями был разработан ряд численных моделей на базе программного комплекса STAR-CCM+. В качестве рабочей среды использовался сухой воздух,двигающийся в турбулентном режиме со средней скоростью в диапазоне от 10 до 100 м/с (что примерно соответствует диапазону частот вращения коленчатого вала $n = 1000\text{--}3000 \text{ мин}^{-1}$ для данного типоразмера ДВС). На входе в модель задавалась скорость потока, выход определялся как выход под давлением чуть ниже барометрического. Для моделирования турбулентного течения использовалась k -я модель турбулентности. Задача решалась в стационарной постановке.

На рис. 1 представлены конфигурации впускной системы ДВС с профилированными впускными трубопроводами, имеющими участки с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника.

Профилированный участок составлял приблизительно 30 % от общей длины системы впуска. В настоящем исследовании использовались участки с поперечным сечением в форме круга, квадрата и равностороннего треугольника. Для всех конфигураций трубопроводов эквивалентный (гидравлический) диаметр d_g равнялся 32 мм (диаметр впускного окна в головке цилиндра двигателя 2Ч 8,2/7,1).

Для исследования газодинамических и расходных характеристик во впускных трубопроводах была разработана экспериментальная установка, представляющая собой натурную модель одноцилиндрового поршневого двигателя размерности 8,2/7,1 (рис. 2). Прототипом установки был автомобильный двигатель «ВАЗ-Ока». Диаметр цилиндра, ход поршня, фазы газораспределения и подъем клапанов установки соответствовали таковым для двигателя-прототипа. Привод коленчатого вала осуществлялся с помощью электродвигателя, частота вращения которого регулировалась в диапазоне от 600 до 3000 мин^{-1} . Подробное описание экспериментальных установок представлено в [3].

Для проведения экспериментальных исследований на базе аналого-цифрового преобразователя создана автоматизированная система измерений основных величин, передающая опытные данные в специализированные программы для обработки. При определении мгновенных значений скорости потока воздуха (w_x) и локального объемного расхода воздуха (V_x) использовался метод термоанемометрирования. Чувствительным элементом датчиков термоанеометра была нихромовая нить диаметром 5 мкм и длиной 5 мм.

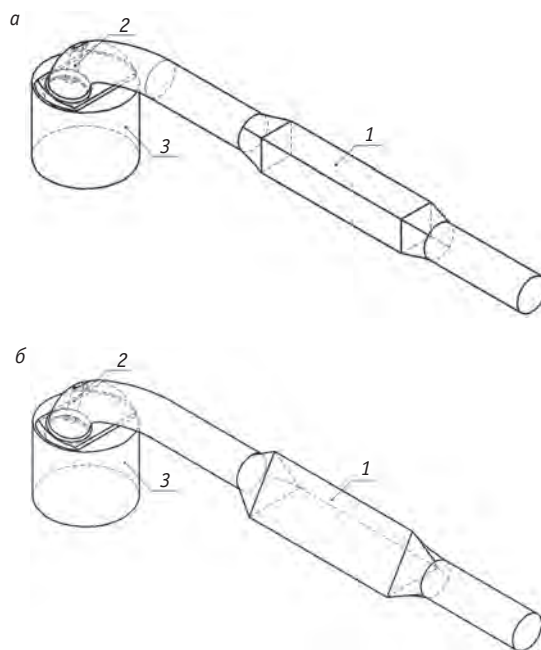


Рис. 1. Схемы исследуемых впускных систем, имеющих участки с квадратным (а) и треугольным (б) поперечными сечениями: 1 — впускной трубопровод с профилированным участком; 2 — впускной клапан; 3 — цилиндр

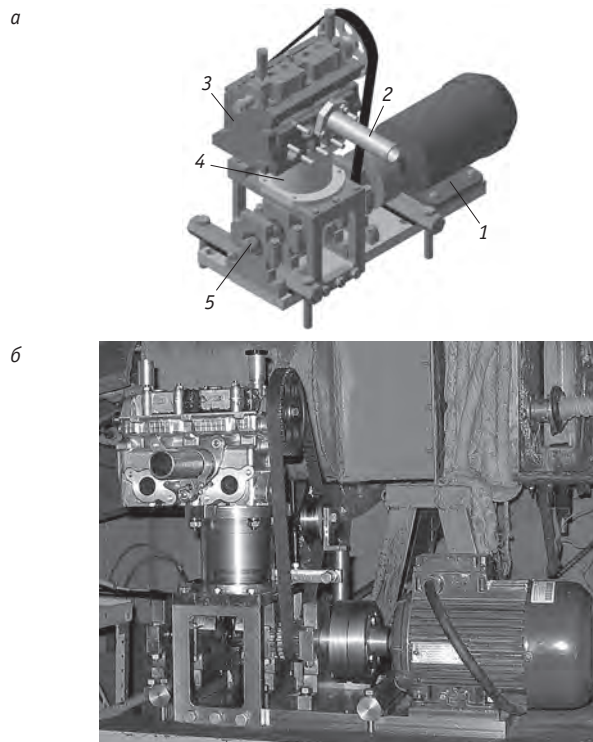


Рис. 2. 3D-модель (а) и фотография (б) экспериментальной установки для исследования процессов газообмена в поршневых двигателях: 1 — электрический привод; 2 — впускной трубопровод; 3 — головка блока; 4 — цилиндр; 5 — коленчатый вал

Частота вращения и угол поворота коленчатого вала двигателя определялись с помощью тахометра. По этим показателям также определялось прохождение поршнем верхней (ВМТ) и нижней (НМТ) мертвых точек. Максимальная систематическая погрешность измерения скорости w_x составляла 5,4 %.

Рассмотрим результаты численного моделирования газодинамики во впускной системе поршневого ДВС размерности 8,2/7,1.

Сначала была проверена гипотеза о том, что вторичные течения (турбулентные структуры), образующиеся в профилированных участках, являются устойчивыми и оказывают существенное влияние на структуру потока во впускном трубопроводе (рис. 3).

Например, из рис. 3б видно, что наличие треугольного участка приводит к довольно существенной деформации структуры течения вниз по потоку на круглом участке. Во-первых, можно отметить изменение форм изотоп в поперечном сечении круглого участка: они имеют ярко выраженную треугольную форму, которая сохраняется до выхода из канала. Во-вторых, на круглом участке трубопровода также сохраняются вторичные течения (турбулентные структуры), которые сформировались на треугольном участке. Следует отметить, что данный эффект сохраняется во всем исследованном диапазоне скоростей потока воздуха.

Таким образом, можно констатировать, что устойчивые вихревые структуры, которые образуются на треугольном участке трубопровода, оказывают существенное влияние на течение и сохраняются на протяжении всего трубопровода. Это позволяет сделать предположение, что данный эффект может быть

использован для стабилизации течений газов во впускной системе и цилиндре поршневого ДВС.

Далее целесообразно рассмотреть влияние поперечного профилирования впускного трубопровода на структуру потока в клапанной щели. Отдельные результаты визуализации течений вблизи клапанной щели для впускных систем с трубопроводами разного поперечного сечения в виде изотоп и касательных векторов скорости, спроецированных из разных сечений, при исходной скорости потока $w = 50$ м/с показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что структура потока вблизи клапанной щели значительно отличается при разных конфигурациях впускного трубопровода. Наиболее существенные вихревые явления наблюдаются во впускной системе с трубопроводом постоянного круглого поперечного сечения (рис. 4а). Наличие во впускной системе профилированного участка с квадратным поперечным сечением вызывает стабилизацию течения вблизи клапана, которая выражается в уменьшении зоны вихревых течений и более плавных и равномерных изотоп в поперечном сечении (рис. 4б). Аналогичные эффекты наблюдаются и при установке во впускной системе профилированного участка с треугольным поперечным сечением (рис. 4в), что характерно для всех скоростей потока воздуха.

Следует отметить, что максимальные значения скорости потока воздуха вблизи клапанной щели во впускной системе с постоянным круглым поперечным сечением составляют около 86 м/с, тогда как в системах с профилированными участками, имеющими квадратное и треугольное поперечные сечения, — около 66 м/с.

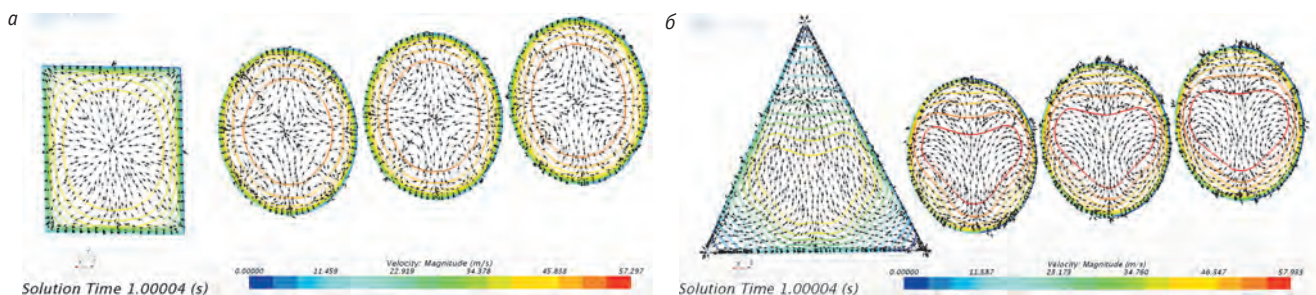


Рис. 3. Визуализация нестационарных течений в трубопроводах разной конфигурации в виде изотоп и касательных векторов скорости, спроецированных из разных сечений (а — квадрат, б — треугольник) при исходной скорости потока 50 м/с

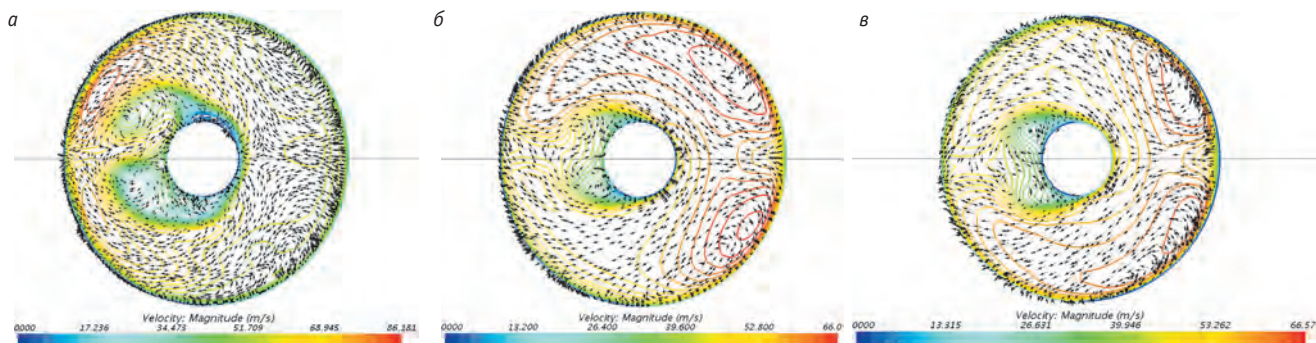


Рис. 4. Визуализация течений в клапанной щели для впускных систем с трубопроводами разного поперечного сечения (а — круг, б — квадрат, в — треугольник) в виде изотоп и касательных векторов скорости, спроецированных из разных сечений, при исходной скорости потока 50 м/с

Далее рассмотрим результаты численного моделирования по влиянию поперечного профилирования впускного трубопровода на структуру течения внутри цилиндра поршневого двигателя (рис. 5). За исходную базу приняты результаты моделирования для традиционной впускной системы автомобильного ДВС с впускным трубопроводом постоянного круглого сечения (рис. 5а).

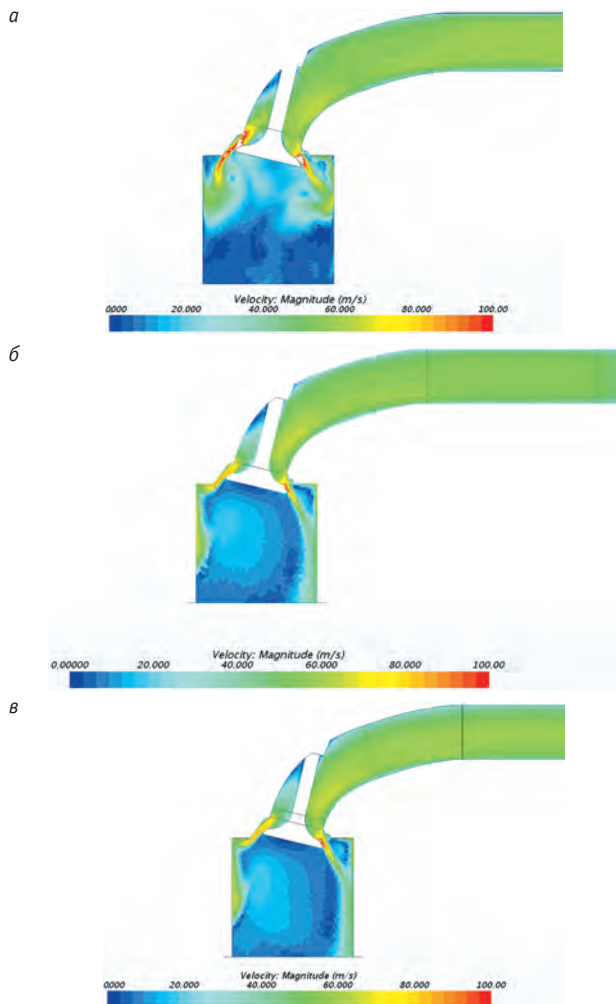


Рис. 5. Визуализация течения во впускной системе с трубопроводами разной конфигурации в виде поля скоростей при исходной скорости потока 50 м/с: форма поперечного сечения — круг (а); квадрат (б); треугольник (в)

Из рис. 5а видно, что во впускной системе с трубопроводами постоянного круглого сечения образуется несколько застойных зон, что согласуется с данными работ [1, 2, 9]. Одна из застойных зон наблюдается вблизи втулки клапана в канале головки цилиндра. Другие две зоны образуются в углах цилиндра. Причем следует отметить, что скорость потока воздуха в клапанной щели превышает 100 м/с. Это также может оказать отрицательное влияние на наполнение цилиндра, поскольку высокие значения скорости потока воздуха приводят к росту гидравлического сопротивления системы.

Совершенно иная структура потока наблюдается при наличии впускного трубопровода с профилированными участками в форме квадрата или равностороннего треугольника (рис. 5б и 5в).

В частности, как видно из рис. 5в, во впускной системе с треугольным профилированным участком застойная зона вблизи впускного клапана существенно уменьшается, фактически отсутствуют застойные зоны в цилиндре, а поле скоростей внутри него становится более равномерным. Это свидетельствует о том, что установка профилированного участка во впускном трубопроводе приводит к стабилизации течения в системе впуска, уменьшению застойных зон и более равномерному полю скоростей внутри цилиндра. Вероятно, это объясняется стабилизирующим влиянием продольных вихревых структур (вторичных течений), образующихся в углах трубопроводов с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника.

Следует отметить, что при использовании профилированного участка с поперечным сечением в форме квадрата также происходит стабилизация течения, но в несколько меньшей степени (см. рис. 5б).

Таким образом, можно предположить, что поперечное профилирование впускного трубопровода должно привести к увеличению расхода воздуха через двигатель, т.е. к лучшему наполнению цилиндра автомобильного ДВС.

Данное предположение было экспериментально проверено применительно к системе впуска поршневого ДВС на одноцилиндровой лабораторной установке, описанной выше. Исследования проводились для конфигурации впускного трубопровода, которая полностью соответствует геометрическим размерам, представленным на рис. 1.

Экспериментально установлено (рис. 6), что во впускных трубопроводах после закрытия впускного клапана возникают сильные колебательные явления. Причем более быстрое их гашение наблюдается в случае использования профилированного участка с треугольным или квадратным поперечными сечениями, что, по мнению авторов, обусловлено стабилизирующим влиянием рассматриваемых вихревых структур, образующихся в углах такой конфигурации [10].

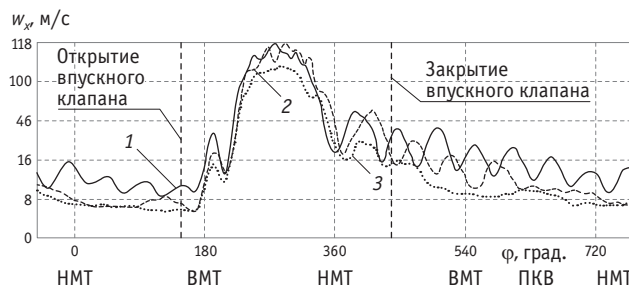


Рис. 6. Зависимости местной ($l_x = 110$ мм, $d = 32$ мм) скорости воздуха w_x во впускных трубопроводах разного поперечного сечения от угла поворота коленчатого вала ϕ для частоты вращения коленчатого вала $n = 3000$ мин⁻¹: форма поперечного сечения — круг (1); квадрат (2); треугольник (3)

Кроме того, экспериментально установлено, что за счет размещения во впускном трубопроводе профилированных участков можно получить ряд преимуществ по сравнению с трубой круглого сечения (рис. 7). Так, при использовании треугольного участка увеличивается в среднем на 22 % объемный расход воздуха через впускную систему и возрастает крутизна зависимости расхода воздуха от частоты вращения коленчатого вала в рабочем диапазоне [11], а использование квадратного участка приводит к линеаризации расходной характеристики во всем диапазоне частот вращения.

В целом проведенное исследование показало, что наличие во впускной системе профилированного участка с поперечными сечениями в форме квадрата или равностороннего треугольника способствует:

существенному изменению структуры течения в системе, что сохраняется вниз по потоку вплоть до цилиндра поршневого двигателя;

стабилизации течения (уменьшению застойных зон, выравниванию поля скоростей) во впускной системе, клапанной щели и цилиндре поршневого двигателя размерности 8,2/7,1;

увеличению объемного расхода воздуха (в среднем на 24 %) через цилиндры поршневого ДВС.

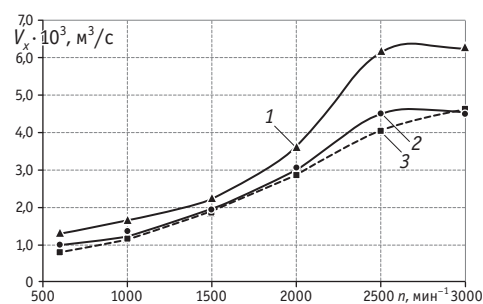


Рис. 7. Зависимости местного ($l_x = 110$ мм, $d = 32$ мм) объемного расхода воздуха V_v через впускные трубопроводы различного поперечного сечения от частоты вращения коленчатого вала n : форма поперечного сечения — треугольник (1); круг (2); квадрат (3)

Таким образом, поперечное профилирование каналов во впускной системе может быть использовано при проектировании газозвуковых трактов поршневых двигателей в целях их газодинамического совершенствования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–38–00004 \ 16 мол.а.

Литература

1. Драганов Б. Х., Круглов М. Г., Обухова В. С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. К. : Вища шк., 1987. 175 с.
2. Вихерт М. М., Грудский Ю. Г. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М. : Машиностроение, 1982. 151 с.
3. Совершенствование процессов в газозвуковых трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания / Б. П. Жилкин, В. В. Лашманов, Л. В. Плотников, Д. С. Шестаков. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2015. 228 с.
4. Григорьев Н. И., Кочев Н. С., Плотников Л. В. Газодинамическое совершенствование системы воздухообеспечения дизеля размерности 21/21 // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-87-91. ISSN 1815-9400.
5. Доводка конфигурации впускного трубопровода дизеля 8ЧН 21/21 на основе численного моделирования / Л. В. Плотников, Д. С. Шестаков, Б. П. Жилкин, Ю. М. Бродов // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 67–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-67-70. ISSN 1815-9400.
6. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : Машиностроение, 1975. 559 с.
8. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов. М. : Машиностроение, 1983. 351 с.
9. Двигатели внутреннего сгорания : в 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов : учеб. / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян и др. ; под ред. В. Н. Луканина. М. : Высшая школа, 1995. 368 с.
10. Плотников Л. В., Жилкин Б. П. Особенности изменения скорости и локального коэффициента теплоотдачи во впускных каналах разной конфигурации поршневого ДВС // Ползуновский вестник. 2012. № 3/1. С. 178–183. ISSN 2072-8921.
11. Плотников Л. В., Жилкин Б. П. Динамические характеристики газодинамики и теплоотдачи во впускном тракте поршневого ДВС // Двигателестроение. 2009. № 2. С. 55–56. ISSN 0202-1633.

References

1. Draganov B. Kh., Kruglov M. G., Obukhova V. S. Konstruirovaniye vpusknykh i vypusknykh kanalov dvigateley vnutrennego sgoraniya [Design of intake and exhaust channels of internal combustion engines]. K. : Vishcha shk., 1987. 175 s.
2. Vikhert M. M., Grudskiy Yu. G. Konstruirovaniye vpusknykh sistem bystrokhodnykh dizely [Designing the intake systems of high-speed diesel engines]. M. : Mashinostroyeniye, 1982. 151 s.
3. Sovershenstvovaniye protsessov v gazovozdushnykh traktakh porshnevnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Perfection of processes in gas-air tracts of reciprocating internal combustion engines] / B. P. Zhilkin, V. V. Lashmanov, L. V. Plotnikov, D. S. Shestakov. Ekaterinburg : Izd-vo UrFU, 2015. 228 s.
4. Grigoryev N. I., Kochev N. S., Plotnikov L. V. Gazodinamicheskoye sovershenstvovaniye sistemy vozdukhosnabzheniya dizelya razmernosti 21/21 [Gas-dynamic improvement of the air supply system of 21/21 diesel] // Transport Urala. 2016. № 3 (50). S. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-87-91. ISSN 1815-9400.
5. Dоводка konfiguratsii vpusknogo truboprovoda dizelya 8ChN 21/21 na osnove chislennogo modelirovaniya [Modernization of the intake pipe configuration of the 21/21 diesel on the basis of numerical modeling] / L. V. Plotnikov, D. S. Shestakov, B. P. Zhilkin, Yu. M. Brodov // Transport Urala. 2017. № 1 (52). S. 67–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-67-70. ISSN 1815-9400.
6. Kutateladze S. S. Teploperedacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye : sprav. posobie [Heat transfer and hydrodynamic resistance : textbook]. M. : Energoatomizdat, 1990. 367 s.
7. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Textbook on hydraulic resistance]. M. : Mashinostroyeniye, 1975. 559 s.
8. Idel'chik I. E. Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov. Podvod, otvod i raspredeleniye potoka po sечeniyu apparatov [Aerohydrodynamics of technological apparatuses. Approach, retraction and distribution of flow along the section of apparatus]. M. : Mashinostroyeniye, 1983. 351 s.
9. Dvigateli vnutrennego sgoraniya : v 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov : ucheb. [Internal combustion engines : 3 books. Book 1. Theory of working processes : textbook] / V. N. Lukanin, K. A. Morozov, A. S. Khachiyani et al. ; pod red. V. N. Lukanina. M. : Vyssh. shk., 1995. 368 s.
10. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. Osobennosti izmeneniya skorosti i lokal'nogo koefitsienta teplootdachi vo vpusknykh kanalakh raznoy konfiguratsii porshnevo DVS [Features of the change in speed and local heat transfer coefficient in the inlet channels of different configuration of the reciprocating internal combustion engine] // Polzunovskiy vestnik. 2012. № 3/1. S. 178–183. ISSN 2072-8921.
11. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. Dinamicheskie kharakteristiki gazodinamiki i teplootdachi vo vpusknom trakte porshnevo DVS [Gas dynamics and heat transfer in reciprocating engine suction line] // Dvigatelstroeniye. 2009. № 2. S. 55–56. ISSN 0202-1633.

УДК 621.314.214.332

Тимофей Сергеевич Тарасовский, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНОЕ УСТРОЙСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ РПН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТРСЗП-12500/10 ЖУ1

Timofey Sergeyevich Tarasovskiy, postgraduate student, Transport Power Supply Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Thyristor-reactor voltage regulation device under load of RPN converter transformer TRSZP-12500/10 ZhU1

Аннотация

Проанализированы недостатки используемых в тяговом электроснабжении способов регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательных трансформаторов. Рассмотрена схема тиристорно-реакторного переключающего устройства (ТРПУ), подключенного к первичной обмотке преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1. Дано описание режимов работы ТРПУ и показаны основные теоретические соотношения его работы. На основе проведенных экспериментальных исследований предложена методика расчета неуправляемого реактора.

Ключевые слова: способы РПН, тяговое электроснабжение, тиристорно-реакторное переключающее устройство, преобразовательный трансформатор, неуправляемый реактор.

Summary

The drawbacks of the methods of voltage regulation used in traction power supply under a load of RPN of converter transformers are analyzed. The scheme of the thyristor-reactor switching device (TRSD) connected to the primary winding of the converter transformer TRSZP-12500/10 ZhU1 is considered. The description of the operation modes of the TRSD is given and the main theoretical relationships of its operation are shown. Based on the experimental studies, a method for calculating an uncontrolled reactor is proposed.

Keywords: RPN methods, traction power supply, thyristor-reactor switching device, converter transformer, uncontrolled reactor.

DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-87-91

В тяговом электроснабжении широко применяются ступенчатый [1] и бесконтактный способы регулирования напряжения под нагрузкой преобразовательных трансформаторов. В первом случае регулирующим органом служат механические переключатели с токоограничивающими элементами. Однако использование этих переключателей характеризуется рядом существенных недостатков: регулирование напряжения осуществляется ступенчато; периодически требуется замена переключателей, что усложняет эксплуатацию устройства. Кроме того, ступенчатый способ регулирования напряжения вносит ограничения в работу системы тягового электроснабжения (СТЭ).

Что касается бесконтактного способа, то он, как показали исследования [2, 3], удовлетворяет требованиям электрической тяги. При бесконтактном реакторном способе регулирования напряжения производится без ступеней — за счет подмагничивания и размагничивания управляемых реакторов, включаемых в регулировочные отводы трансформатора.

С целью совершенствования устройств РПН преобразовательных трансформаторов нами предлагается схема тиристорно-реакторного переключающего устройства. По сравнению с бесконтактным реакторным способом регулирования использование тиристорных и реакторных элементов позволяет увеличивать коэффициент мощности преобразовательного трансформатора, снижать потери электроэнергии и массогабаритные показатели устройства РПН, а также одновременно обеспечивает возможность плавного регулирования напряжения.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ СХЕМЫ

Принципиальная электрическая схема первичной обмотки трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 с устройством переключения отводов трансформатора без возбуждения (устройство ПБВ) в диапазоне $\pm 2,25\%$ от номинального напряжения показана на рис. 1а. При номинальном напряжении питающей сети $U_{1н} = 10,5$ кВ перемычкой соединяются отводы 3 и 4; при длительном повышении напряжения до $U_{1н} + 5\% \cdot U_{1н} = 11,025$ кВ

соединяются отводы 1 и 2, при понижении напряжения до $U_{\text{н}} - 5\% \cdot U_{\text{н}} = 9,925 \text{ кВ}$ соединяются отводы 5 и 6. В этих вариантах соединения отводов на выходе трансформатора получаем внешнюю характеристику с постоянным напряжением холостого хода. Тиристорно-реакторное переключающее устройство (ТРПУ), подключенное к отводам регулировочной обмотки трансформатора, представлено на рис. 1б.

Первичная обмотка трансформатора разделена на две части, каждая из которых включает в себя сетевую обмотку (СО) с числом витков $0,5 w_{\beta}$ и регулировочную обмотку (РО) с числом витков $2,0,25 w_{\alpha}$ (w_{β} и w_{α} — соответственно полное число витков СО и РО). В первой части начало СО подсоединено к питающей сети, а ее конец через тиристорный ключ (ТК) соединен с началом СО второй части, конец которой при схеме соединения первичной обмотки «звезда» образует нейтраль с другими фазами трансформатора. Между концом РО первой части и началом РО второй части включен неуправляемый реактор (НР).

В зависимости от состояния тиристорных ключей работа ТРПУ может быть рассмотрена в двух режимах:

при открытом тиристорном ключе фазное напряжение сети U_1 подается только на СО первичной обмотки трансформатора, тем самым обеспечивая наибольшее напряжение на нагрузке. При этом НР ограничивает циркулирующий ток, возникающий в контуре РО;

при закрытом тиристорном ключе напряжение сети приложено к полному числу витков первичной обмотки трансформатора и неуправляемому реактору. В этом случае напряжение на нагрузке минимально.

При изменении напряжения сети U_1 в диапазоне от -5% до $+5\%$ от номинального, т.е. от $U_{1\text{мин}} = 9,925 \text{ кВ}$ до $U_{1\text{макс}} = 11,025 \text{ кВ}$, ТРПУ работает непрерывно в трех режимах с получением внешних характеристик, представленных на рис. 2.

1. При $U_1 = U_{1\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$ получаем две ограничительные внешние естественные характеристики 1 (постоянно открыт ТК) и 2 (постоянно закрыт ТК) и стабилизированные характеристики 3–5 от нуля до номинального тока подстанции $I_{\text{дн}}$ с обеспечением релейного режима работы тиристорного ключа (открыт — закрыт).

2. При $U_1 = U_{\text{н}} - 5\% = 9,925 \text{ кВ}$ имеем естественную характеристику 6, где напряжение холостого хода на шинах подстанции составит $U_{\text{д0}} = 3500 \text{ В}$ при постоянно открытом ТК.

3. При $U_1 = U_{\text{н}} + 5\% = 11,025 \text{ кВ}$ получаем также естественную характеристику 6, где $U_{\text{д0}} = 3500 \text{ В}$ при постоянно закрытом ТК.

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для рассмотрения основных соотношений трехфазного трансформатора с устройством ТРПУ (рис. 3) введем следующие обозначения:

U_1, U_2 — первичное и вторичное фазное напряжение трансформатора;

U_{10}, U_{20} — первичное и вторичное фазное напряжение холостого хода трансформатора;

E_1, E_2 — первичная и вторичная ЭДС трансформатора;

W_1, W_2 — число витков первичной и вторичной обмоток;

E_{α}, E_{β} — ЭДС регулировочной и сетевой обмоток;

I_1, I_2 — первичный и вторичный ток трансформатора;

I_0 — ток холостого хода трансформатора;

$I_{\text{НР}}$ — ток, протекающий через НР;

$U_{\text{НР}}$ — напряжение на НР;

$Z_{\text{НР}}$ — полное сопротивление НР;

Z_1, Z_2 — полные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора;

Z_{α}, Z_{β} — полные сопротивления РО и СО;

$Z_{\text{н}}$ — полное сопротивление нагрузки.

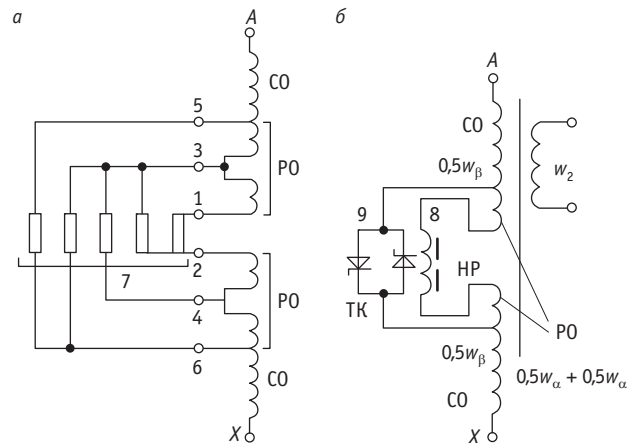


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема одной фазы первичной обмотки преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1:

а — с ПБВ; б — с ТРПУ; 1–6 — отводы обмоток трансформатора; 7 — переключики; 8 — неуправляемый реактор; 9 — тиристорный ключ

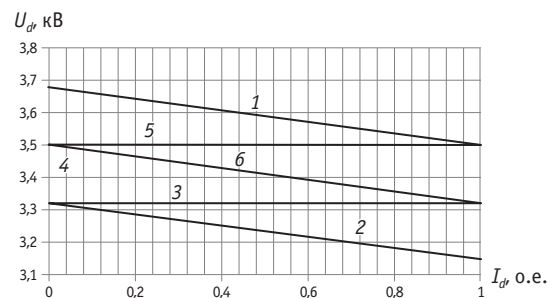


Рис. 2. Внешние характеристики регулируемого преобразователя: 1, 2, 6 — естественные; 3, 4, 5 — автоматические стабилизированные

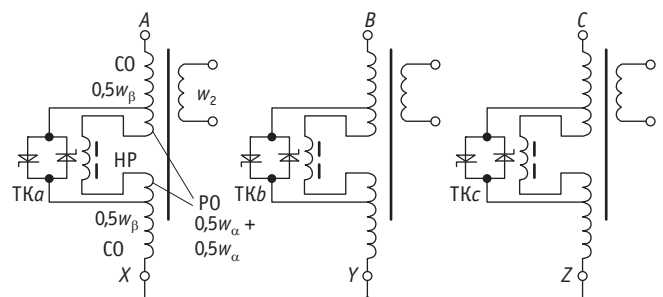


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема соединений ТРПУ и первичных обмоток трехфазного трансформатора

К особенностям работы трансформатора с ТРПУ можно отнести [4, 5] следующие.

1. Коэффициент трансформации изменяется по закону

$$K_p = K_\beta + \rho K_\alpha, \quad (1)$$

где $K_\beta = \frac{w_\beta}{w_2}$ и $K_\alpha = \frac{w_\alpha}{w_2}$;

ρ — параметр, зависящий от состояния (сопротивления) тиристорных ключей R_{TK}

$$\rho = \frac{R_{TK}}{Z_\alpha + Z_{HP} + Z_{TK}}. \quad (2)$$

Параметр ρ изменяется от минимального до максимального значения, соответственно $K_{pmin} = K_\beta$ и $K_{pmax} = K_\beta + K_\alpha$.

2. Вторичное напряжение холостого хода

$$U_{20} = \frac{1}{K_p} U_1 \quad (3)$$

также имеет максимальное и минимальное значения.

3. Циркулирующий ток, протекающий в замкнутой цепи «регулирующая обмотка — тиристорный ключ — неуправляемый реактор», определяется из уравнения

$$I_\alpha = \frac{K_\alpha U_{10}}{K_p (Z_\alpha + Z_{HP} + R_{TK})} \quad (4)$$

и зависит от состояния тиристорных ключей.

4. Трансформаторный агрегат имеет переменное внутреннее сопротивление, приведенное к числу витков вторичной обмотки:

$$Z_T = \frac{1}{K_p^2} [Z_\beta + (1 - \rho) R_{TK}] + Z_2. \quad (5)$$

При закрытых тиристорных ключах принципиальная электрическая схема первичной обмотки трансформатора с ТРПУ (см. рис. 3) может быть представлена принципиальной электрической схемой, показанной на рис. 4. Ток нагрузки протекает через СО, РО и дополнительное сопротивление в виде НР. Концы реакторов соединены в общую точку (нейтраль).

Основные соотношения одной фазы трансформаторного агрегата (например, А) представлены в системе

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{Ax} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (Z_\beta + Z_\alpha) \\ \dot{U}_{HP} &= \dot{I}_1 Z_{HP} \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_\alpha + \dot{E}_\beta \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_2 Z_H \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta + w_\alpha} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

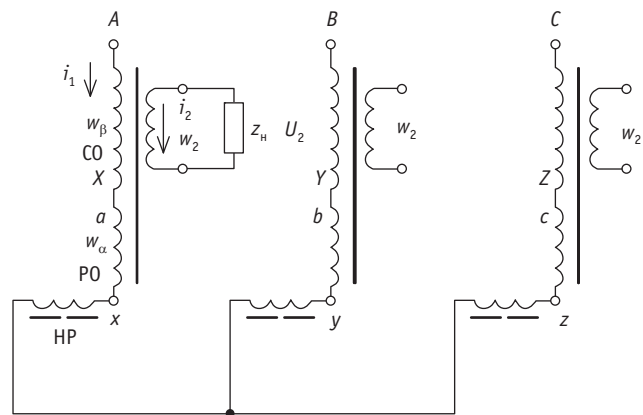


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема первичной обмотки трехфазного трансформатора с ТРПУ при закрытых тиристорных ключах

При открытых тиристорных ключах принципиальная электрическая схема первичной обмотки трансформатора с ТРПУ (см. рис. 3) также может быть представлена принципиальной электрической схемой, показанной на рис. 5. Ток нагрузки будет протекать через СО и ТК. Однако в контуре РО начнет протекать циркулирующий ток I_α . Принципиальная схема одной фазы при открытом ТК и с контуром протекания циркулирующего тока приведена на рис. 5б.

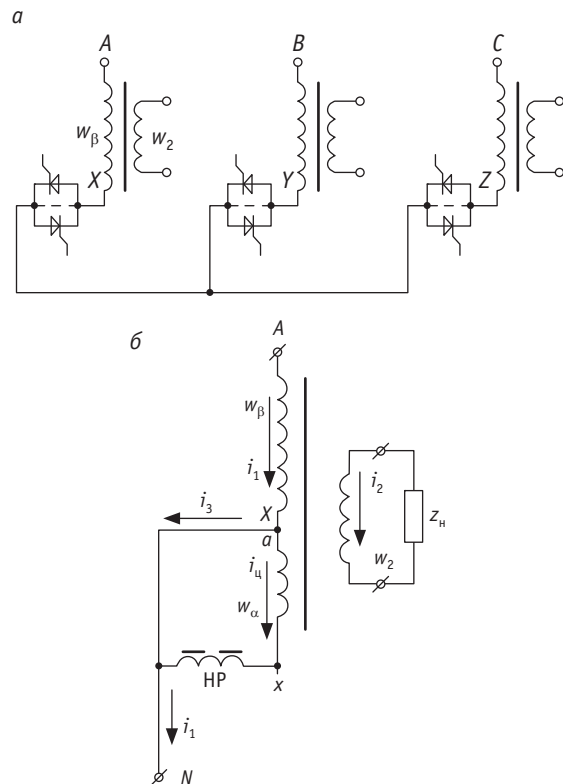


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема первичной обмотки трансформатора с ТРПУ при открытых тиристорных ключах: а — сетевые обмотки; б — регулировочная обмотка одной фазы

Если пренебречь сопротивлением открытого тиристорного ключа $R_{\text{ткр}}$, то основные соотношения могут быть представлены системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{Ax} = -\dot{E}_\beta + \dot{I}_1 Z_\beta \\ U_{\text{нр}} &= \dot{I}_\alpha Z_{\text{нр}} = \dot{E}_\alpha - \dot{I}_\alpha Z_\alpha \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_2 Z_{\text{н}} \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{K_\beta} + \dot{I}_\alpha \frac{K_\alpha}{K_\beta} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_\beta} + \dot{I}_\alpha \frac{w_\alpha}{w_\beta} \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 - \dot{I}_\alpha \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРА

Для минимизации потерь мощности на неуправляемом реакторе необходимо определить его рациональное сопротивление. С одной стороны, в режиме работы с закрытыми тиристорными ключами неуправляемый реактор играет роль лишь дополнительного сопротивления, препятствующего протеканию тока нагрузки, следовательно, рациональная величина сопротивления должна стремиться к нулю: $Z_{\text{нр}} \rightarrow 0$. С другой стороны, при открытых тиристорных ключах для снижения потребляемой преобразовательным агрегатом мощности неуправляемый реактор должен максимально ограничивать циркулирующий ток. В этом случае величина сопротивления НР стремится к бесконечности: $Z_{\text{нр}} \rightarrow \infty$.

Рассмотрим методику расчета сопротивления неуправляемого реактора применительно к трехфазному трансформатору мощностью 30 кВА, $U_{1\text{ф}} = 220$ В. Исходные данные — вольт-амперная характеристика (ВАХ) преобразовательного агрегата без ТРПУ (рис. 6) и величина тока первичной обмотки I_1 .

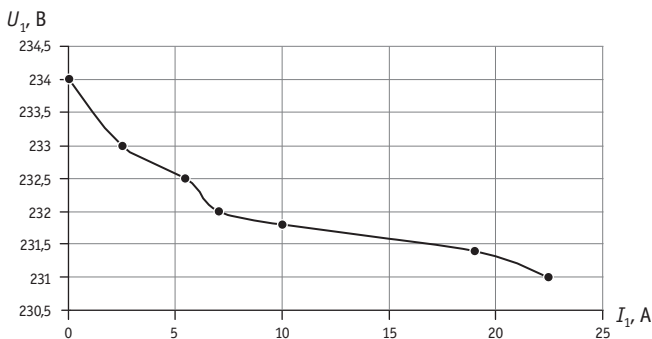


Рис. 6. Вольтамперная характеристика преобразовательного агрегата без ТРПУ

Известно, что особенностью тяговой нагрузки является ее изменение от нуля до максимального значения. По полученным графикам нагрузок производится обработка статистического материала, в соответствии с которым строится график времени протекания различных значений тока нагрузки. По вертикальной оси откладывается время протекания величины тока

нагрузки в процентах от периода наблюдений, по горизонтальной — значения тока нагрузки.

В настоящей методике предположим, что средняя величина тока нагрузки трансформатора за весь период наблюдения соответствует $0,5 I_{\text{ном}}$ и равна $I_1 = 0,5 I_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 45 = 22,5$ А.

Из всего множества значений сопротивлений неуправляемого реактора необходимо найти рациональную величину. Критерием выбора может быть принята величина потребленной электроэнергии, так как она позволяет учитывать потери мощности НР в течение времени.

В режиме работы ТРПУ, когда тиристорные ключи закрыты, через неуправляемый реактор протекает ток нагрузки. При этом потери мощности НР определяются в соответствии с системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (Z_1 + Z_{\text{нр}}) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{\text{нр}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_{\text{нр}} + \frac{Z_0 (Z'_2 + Z'_{\text{н}})}{Z_0 + Z'_2 + Z'_{\text{н}}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{нр}} + Z_{\text{та}}} \\ \dot{U}_{\text{нр}} &= \dot{I}_{\text{нр}} Z_{\text{нр}} \\ P_{\text{нр}} &= \dot{U}_{\text{нр}} \dot{I}_{\text{нр}} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где Z_0 — полное сопротивление холостого хода трансформатора, Ом;

$P_{\text{нр}}$ — потребляемая неуправляемым реактором мощность, Вт;

$Z'_2, Z'_{\text{н}}$ — приведенные значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора и нагрузки, Ом;

$Z_{\text{та}}$ — полное сопротивление преобразовательного агрегата без ТРПУ, Ом, которое определяется по формуле $I = \frac{U}{Z_{\text{та}}}$ в соответствии с вольтамперной характеристикой (см. рис. 6).

В режиме с открытыми тиристорными ключами для уменьшения потребляемой ТРПУ из сети мощности НР должен максимально ограничивать циркулирующий ток.

Величина мощности, потребляемая преобразовательным агрегатом для компенсации циркулирующего тока, определяется в соответствии с системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_\alpha &= \frac{E_\alpha}{Z_\alpha + Z_{\text{нр}}} \\ \dot{U}_{\text{нр}} &= \dot{I}_\alpha Z_{\text{нр}} \\ P_{\text{нр}} &= \dot{U}_{\text{нр}} \dot{I}_\alpha \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

После проведения расчетов потребляемой мощности для обоих режимов работы с целью определения рационального сопротивления НР строится зависимость потерь мощности преобразовательного агрегата от сопротивления НР, т.е. $P_{\text{нр}} = f(Z_{\text{нр}})$, представленная на рис. 7.

На графике (см. рис. 7) точка пересечения показывает рациональное значение сопротивления НР, т.е. $Z_{\text{нр}} = 0,9$ Ом, для обоих режимов работы ТРПУ при $I_1 = 22,5$ А.

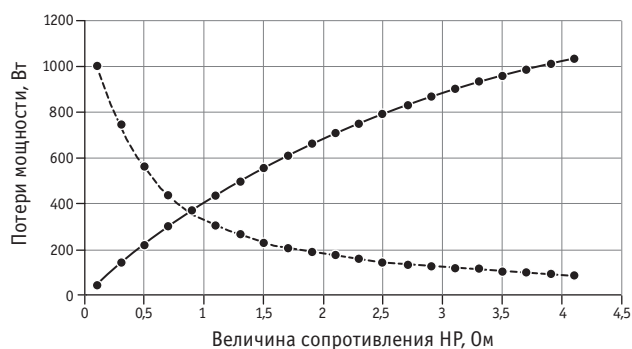


Рис. 7. Графическая зависимость потерь мощности НР от его сопротивления:

—●— — ключи закрыты; ---●--- — ключи открыты

Однако рассмотренный способ не учитывает временную составляющую работы каждого режима. Для решения данного вопроса необходимо ввести следующие величины:

T — общее время работы ТРПУ за рассматриваемый период, ч;

K_3 и K_0 — время работы каждого режима ТРПУ с закрытыми и открытыми тиристорными ключами соответственно, % от периода наблюдений T .

Эти величины подставляются в формулу определения потерь мощности систем уравнений (8), (9). В результате для режима с закрытыми ключами получаем

$$P_T = \dot{U}_{\text{НР}} \dot{I}_{\text{НР}} T \cdot K_3, \quad (10)$$

а для режима с открытыми ключами

$$P_T = \dot{U}_{\text{НР}} \dot{I}_{\text{Ц}} T \cdot K_0, \quad (11)$$

где P_T — потребляемая НР мощность за рассматриваемый период времени, Вт·ч.

Предположим, что общее время работы ТРПУ $T = 168$ ч, причем в режиме с закрытыми ключами $K_3 = 25\%$, с открытыми $K_0 = 75\%$. Тогда в соответствии с (8)–(11) можно построить зависимость потребленной из сети электроэнергии, потраченной на покрытие потерь в НР и компенсацию $I_{\text{Ц}}$ от величины сопротивления НР, т.е. $P_T = f(Z_{\text{НР}})$ (рис. 8). Как видно из рис. 8, рациональное значение сопротивления НР составляет $Z_{\text{НР}} = 1,7$ Ом для обоих режимов работы ТРПУ при $I_1 = 22,5$ А.

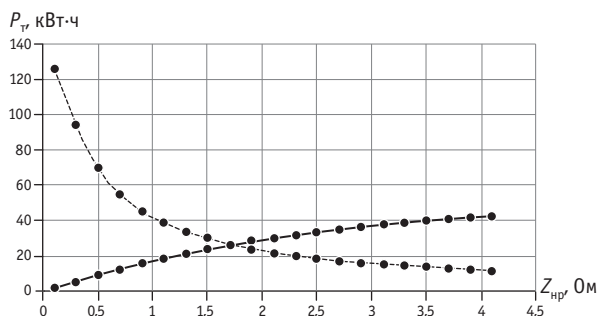


Рис. 8. Графическая зависимость потребленной из сети электроэнергии на покрытие потерь в НР и компенсацию $I_{\text{Ц}}$ от величины сопротивления:

—●— — ключи закрыты; ---●--- — ключи открыты

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы недостатки применяемых в тяговом электроснабжении способов регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой РПН.

2. Предложена схема тиристорно-реакторного устройства РПН, подключенного к первичной обмотке трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1. Показаны основные теоретические соотношения работы устройства.

3. Разработанная методика применима для определения рационального сопротивления неуправляемого реактора для ТРПУ трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 с учетом времени работы в каждом режиме T и $I_1 = 627$ А.

Литература

1. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы: учеб. / Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1972. 544 с.
2. Фишлер Я. Л., Урманов Р. Н., Ланге В. В. Трансформатор 35 кВ с бесконтактным регулированием напряжения // Труды УЭМИИТа. 1966. Вып. 14.
3. Ветлугин Е. М., Урманов Р. Н. Плавное регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой с помощью дросселей насыщения // Труды УЭМИИТа. 1962. Вып. 5.
4. Аржанников Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2017. 101 с.
5. Набойченко И. О., Аржанников Б. А., Сергеев Б. С. Электроснабжение устройств автоматики, телемеханики и связи // Железнодорожный транспорт. 2004. № 6. С. 48–49. ISSN 0044-4448.

References

1. Kostenko M. P., Piotrovskiy L. M. Elektricheskie mashiny. Ch. 1. Mashiny postoyannogo toka. Transformatory [Electrical machines. Part 1. Direct current machines. Transformers]: учеб. / Izd. 3-e, pererab. L.: Energiya, 1972. 544 s.
2. Fishler Ya. L., Urmanov R. N., Lange V. V. Transformator 35 kV s beskontaktnym regulirovaniem napryazheniya [35 kV transformer with non-contact voltage regulation] // Trudy UEMII Ta. 1966. Vyp. 14.
3. Vetlugin E. M., Urmanov R. N. Plavnoe regulirovanie napryazheniya silovykh transformatorov pod nagruzkoy s pomoshchyu drossелей насыщения [Smooth regulation of the voltage of the power transformers under load by means of saturation chokes] // Trudy UEMII Ta. 1962. Vyp. 5.
4. Arzhannikov B. A. Ustroystva regulirovaniya napryazheniya preobrazovatelnykh transformatorov pod nagruzkoy: учеб. posobie [Devices for regulating the voltage of transforming transformers under load: textbook]. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2017. 101 s.
5. Naboychenko I. O., Arzhannikov B. A., Sergeev B. S. Elektrosnabzhenie ustroystv v sistem avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Power supply of automation, remote control and communication devices and systems] // Zheleznodorozhnyy transport. 2004. № 6. S. 48–49. ISSN 0044-4448.

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: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2017 г.</p> |
| Квитанция | <p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2017 г.</p> |

Подписка на 2018 год.

Периодичность — 4 номера в год.



ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество
комплектов:

на 2017 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 2017 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

№ 3 (54), 2017 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 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.

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Учредитель:

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

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

Дизайн:

Антон Леонидович Курносов

Верстка:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Никита Вячеславович Клейменов

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 30.09.2017

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета
в типографии ООО «Типография для Вас».

620073, г. Екатеринбург, ул. Крестинского, д. 37/2, к. 59.

Тел./факс: (343) 211-0-300. E-mail: ooo_for_you@mail.ru

Заказ №

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2017