

**СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА
МЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИЯ В ПРОВОДАХ
И ТРОСАХ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ
ПОРТОВЫХ УГОЛЬНЫХ
ТЕРМИНАЛОВ РОССИИ**

**ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ
НА РАСХОД ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ**

**ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ
УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
К ПРОПУСКУ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ**

**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВПУСКА И ВЫПУСКА
В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**



Подписка на 2016 год.

Стоимость одного номера — 180 рублей.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

**АБОНЕМЕНТ**на ~~газету~~
журнал**46463**

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество
комплектов:

на 2016 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКАна ~~газету~~
журнал**46463**

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	руб. ____ коп.		

на 2016 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Ефимов, 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. Грицык Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Ростов
5. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
6. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
9. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
10. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
11. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
12. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
15. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
16. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Efimov, 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. Gritsyk Valeriy Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
9. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
12. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
15. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
16. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, А. В. Мягкова. Математические модели движения вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра (в упрощенной постановке задачи)	3
Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. В. Седых, В. Л. Иванов, М. Е. Медведев, Г. Ф. Насонов, Ю. А. Черногоров. Способ непрерывного мониторинга механического усилия в проводах и тросах контактной подвески	9
Н. В. Купцов. Перспективы развития морских портовых угольных терминалов России	16
С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов. Полимерные композиционные материалы в транспортном строительстве	24
П. Н. Рубежанский. Поведенческий метод в организации управления результативностью производства	31

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н. С. Нестерова, В. А. Анисимов. Методика оценки эксплуатационной надежности железнодорожного участка	35
---	----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная. Влияние показателей использования локомотивов на расход энергоресурсов в грузовом движении	41
Д. В. Муравьев. Анализ потерь мощности в электромагнитных контакторах типа МК электровозов постоянного и переменного тока	46
П. Н. Рубежанский. Методология организации комплексной системы локомотиворемонтного производства	53
Д. И. Хомич, В. С. Тимченко. Алгоритмизация процесса распределения локомотивов в хозяйственном движении	57

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Б. В. Рожкин. Оценка готовности устройств автоматики к пропуску тяжеловесных поездов	61
А. П. Разгонов, А. Ю. Лебедев, А. Ю. Журавлев, С. А. Щиголов. Диагностика электрических машин с использованием беспроводных каналов передачи информации	66

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Р. Ю. Упырь, А. И. Кузнецова, П. Батхуяг. Методика свивки проволочных средств крепления	72
---	----

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. А. Свечников, В. В. Янковский, М. А. Герасимов. Особенности синтеза и анализа кинематических схем транспортных механизмов в среде SolidWorks	78
---	----

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

И. В. Плотников, В. М. Меланин, А. М. Денисов. Методика оценки остаточного ресурса грузовых вагонов при продлении срока их службы	83
---	----

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

М. И. Глушко, Н. Г. Фетисова, А. Р. Галиуллин. Контроль состояния тормозов моторвагонного подвижного состава	86
--	----

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов, А. Н. Штин. Расчет среднего значения выпрямленного напряжения холостого хода 12-пульсового преобразовательного агрегата с пофазным РПН трансформатора	88
А. П. Сухогузов, Н. Л. Иванов, Ю. А. Кочунов. Термомеханические испытания полимерного кронштейна	93

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

А. В. Гриценко, К. В. Глемба, О. Н. Ларин, С. С. Куков, Д. Д. Бакайкин. Исследование способа повышения экологичности и экономичности автотранспорта на тестовых режимах холостого хода работы двигателя внутреннего сгорания	97
Л. В. Плотников, Б. П. Жилкин, Н. С. Кочев. Моделирование и экспериментальные исследования процессов впуска и выпуска в автомобильных двигателях внутреннего сгорания	103
Н. В. Савенков. Повышение топливной экономичности автомобиля категории N ₁ оптимизацией параметров силовой установки	108

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko, A. V. Myagkova. Mathematical model of car motion on the second high-speed section of hump when exposed to tailwind (simplified formulation of the problem)	3
D. V. Efanov, G. V. Osadchiy, D. V. Sedykh, V. L. Ivanov, M. E. Medvedev, G. F. Nasonov, Yu. A. Chernogorov. A method for continuous monitoring of mechanical tension in catenary wires and cables	9
N. V. Kuptsov. Development prospects of Russian marine coal terminals	16
S. A. Bokarev, D. N. Smerdov. Polymer composite materials in transport construction industry	24
P. N. Rubezhanskiy. Behavioral method in performance management	31

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

N. S. Nesterova, V. A. Anisimov. A method to determine operating reliability of a railway section	35
---	----

ROLLING STOCK AND TRACTION

E. A. Sidorova, S. O. Podgornaya. Effect of locomotive utilization rate on energy consumption in freight traffic	41
D. V. Muravyov. Analysis of power losses in magnetic contactors of MK-type DC and AC locomotives	46
P. N. Rubezhanskiy. A method for organization of integrated system of a locomotive repair facility	53
D. I. Khomich, V. S. Timchenko. Algorithmization of locomotive distribution process in commercial traffic	57

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

B. V. Rozhkin. Assessment of readiness of automation devices for heavy train traffic	61
A. P. Razgonov, A. Yu. Lebedev, A. Yu. Zhuravlyov, S. A. Shchigolev. Diagnosis of electric machines using wireless data transmission channels	66

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

R. Yu. Upyr, A. I. Kuznetsova, P. Batkhuyag. A method for stranding wire fasteners	72
--	----

TRANSPORT MACHINERY

A. A. Svechnikov, V. V. Yankovskiy, M. A. Gerasimov. Specifics of synthesis and analysis of kinematic diagrams of transport mechanisms in SolidWorks	78
--	----

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

I. V. Plotnikov, V. M. Melanin, A. M. Denisov. A method to determine residual life of freight cars when extending their service life	83
--	----

ELECTRIC TRACTION

M. I. Glushko, N. G. Fetisova, A. R. Galiullin. Brake condition monitoring in multiple unit trains	86
--	----

ELECTRIC SUPPLY

B. A. Arzhannikov, L. A. Frolov, A. N. Shtin. Calculating the average rectified no-load voltage of 12-pulse converter unit with single-phase transformer OLTC	88
A. P. Sukhoguzov, N. L. Ivanov, Yu. A. Kochunov. Thermomechanical testing of a polymer bracket	93

MOTOR TRANSPORT

A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, O. N. Larin, S. S. Kukov, D. D. Bakaykin. Research of a method to improve environmental performance and economical efficiency of motor transport with combustion engine in test idle modes	97
L. V. Plotnikov, B. P. Zhilkin, N. S. Kochev. Simulation and experimental studies of intake and exhaust processes in automotive internal combustion engines	103
N. V. Savenkov. Improvement of fuel efficiency of the N ₁ category vehicle by optimization of power plant parameters	108

УДК 656.21.001.2

Хабибулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Андрей Александрович Гордиенко, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Алена Валерьевна Мягкова, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПУТНОГО ВЕТРА (В УПРОЩЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ)

Khabibulla Turanovich Turanov, DSc in Engineering, Professor, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Andrey Alexandrovich Gordienko, Assistant Lecturer, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Alyona Valeryevna Myagkova, Assistant Lecturer, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Mathematical model of car motion on the second high-speed section of hump when exposed to tailwind (simplified formulation of the problem)

Аннотация

В статье изложены результаты исследования движения вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины. Получены аналитические формулы для определения сил, действующих на систему «вагон — путь», при движении вагона по длине этого участка до стрелочного перевода и после стрелки по кривому участку пути. Выведены аналитические формулы времени движения и скорости скатывания вагона.

Ключевые слова: сортировочная горка, вагон, попутный ветер, движение вагона на втором скоростном участке, время движения и скорость скатывания вагона.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-3-8

Summary

The article presents the results of a study of car movement on the second high-speed section of hump when exposed to light tailwind. Analytical formulas have been derived to determine forces acting on «car — tracks» system while the car is moving along the section to the turnout and after the turnout on the curved track portion. Analytic formulas of time and speed of car rolling have been derived.

Keywords: hump yard, car, tailwind, car movement on the second high-speed section, car rolling time and speed.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-3-8

Упрощенные математические модели движения вагона на скоростных участках и на участке первой тормозной позиции при воздействии попутного ветра малой величины изложены в [1–3]. Однако, как замечено нами впоследствии, в [1–3] допущены некоторые неточности представления диаграммы скорости попутного ветра и скорости движения вагона по уклону горки. В [4–6] приведены примеры расчета времени движения и скорости вагона с использованием аналитических формул из [1–3].

В настоящей статье движение вагона на втором скоростном участке горки при воздействии попутного ветра разделено на два этапа: на первом вагон движется до стрелочного перевода (в дальнейшем — до стрелки), а на втором — после стрелочного перевода по кривому участку пути (в дальнейшем — после стрелки). Результаты исследований, которые представлены в [1–6], соответствуют второму этапу, в то время как движение вагона на первом этапе до сих пор не изучено.

Таким образом, аналитическое исследование времени движения и скорости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины последовательно на первом и на втором этапах является актуальным. Кроме того, настоящая статья продолжает серию публикаций [1–13], посвященных динамике скатывания вагона по профилю сортировочной горки. Особо отметим, что в ней использованы основные подходы и результаты работ [7, 8].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработать уточненную математическую модель движения вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины в упрощенной постановке задачи, которая позволила бы определить ускорение вагона на данном участке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется доказать, что время движения и скорость скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки можно определить по классическим формулам физики. Это позволит с большей точностью рассчитывать параметры последующих участков профиля горки.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Воспользуемся основными положениями теоретической механики — законом Кулона, принципом Д'Аламбера в координатной форме [14] и классическими формулами скорости и пути.

УСЛОВИЯ ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Аналогично [7, 8] рассмотрим общий случай, когда вагон с сортировочной горки скатывается поступательно с заданной начальной скоростью $v_0 = v_{02}$ после выхода с первого скоростного участка. При скатывании с горки он будет испытывать воздействие внешних сил — силы тяжести \vec{G} и силы аэродинамического сопротивления встречного ветра малой величины $\vec{F}_{\text{рв}}$, где $(\vec{F}_{\text{рвх}}, \vec{F}_{\text{рвy}}) \in \vec{F}_{\text{рв}}$.

Пусть, как и в [8], вагон с переносной скоростью $v_e = v$ прямолинейно движется с сортировочной горки относительно подвижной системы координат $Ox_1y_1z_1$ (рис. 1). Все обозначения на рис. 1 соответствуют обозначениям аналогичного рисунка из работы [8], за исключением угла уклона второго скоростного участка горки ψ_{02} .

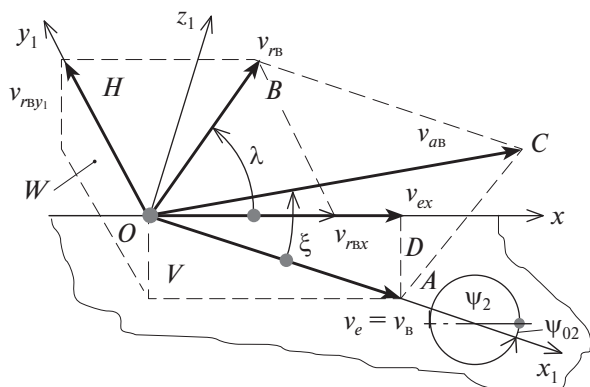


Рис. 1. Векторная диаграмма скорости вагона и попутного ветра на втором скоростном участке горки

Будем иметь в виду, что при проектировании сортировочной горки такие ее кинематические параметры, как проекция длины на горизонталь $l_{\text{тj}}$ и угол уклона (спуска) ψ_{0j} (где $j = 2; 2с$ — номера второго скоростного участка до и после стрелки), принимают согласно [15], например, $l_{\text{т2}} \approx 15$ м, $\text{tg}\psi_{02} = 0,025\text{--}0,035$

(или $\psi_{02} = 1,432\text{--}2,005$ град). По значениям $l_{\text{тj}}$ и $\text{tg}\psi_{0j}$ определим высоту горки h_j , а далее — длину ее уклона l_j м:

$$h_j = l_{\text{тj}} \text{tg}(\psi_{0j}); l_j = \sqrt{h_j^2 + l_{\text{тj}}^2} \text{ или } l_j = \frac{l_{\text{тj}}}{\cos(\psi_{0j})}. \quad (1)$$

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СКАТЫВАНИЯ ВАГОНА ПО ВТОРОМУ СКОРОСТНОМУ УЧАСТКУ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Упрощенная модель воздействия сил на систему «вагон — путь» на втором скоростном участке горки при попутном ветре, учитывающая трение качения колес со скольжением, как и в [8], представлена на рис. 2.

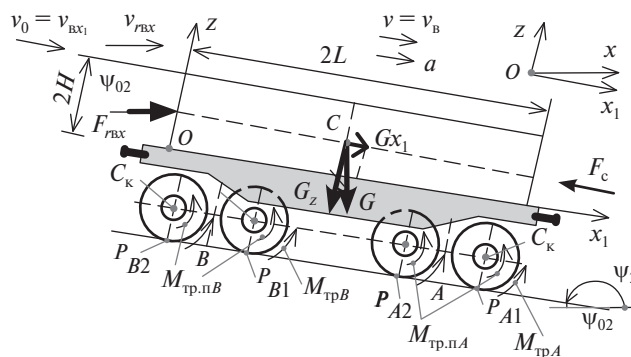


Рис. 2. Упрощенная модель воздействия сил на систему «вагон — путь» на втором скоростном участке горки при попутном ветре

Все обозначения на рис. 2 соответствуют обозначениям аналогичного рисунка из [8], за исключением того, что на первом этапе движения вагон испытывает воздействие только сил сопротивления среды, т.е. $F_c = F_{\text{ср}}$, а на втором этапе — сил сопротивления всякого рода (среды $F_{\text{ср}}$, стрелок $F_{\text{стр}}$, кривых $F_{\text{кр}}$, снега и инея $F_{\text{с.и}}$), т.е. $F_c = F_{\text{ср}} + F_{\text{стр}} + F_{\text{кр}} + F_{\text{с.и}}$.

С использованием принципа освобожденности от связей [14] аналогично [8] получим расчетную модель движения вагона на промежуточном участке горки (рис. 3).

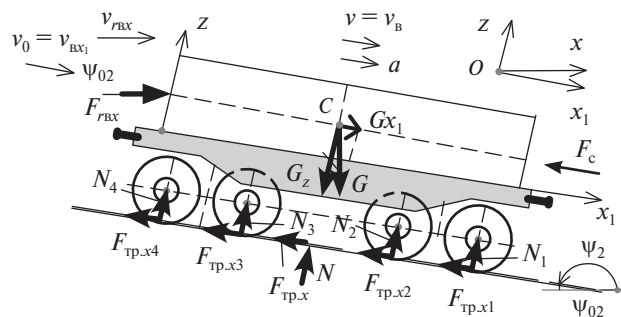


Рис. 3. Упрощенная расчетная модель движения вагона по профилю второго скоростного участка горки при попутном ветре

Все обозначения на рис. 3 такие же, как и в [8], за исключением нормальной N и касательной $F_{\text{тр.х}}$ составляющих реакции связи (рельсовых нитей), т.е. $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$, а $F_{\text{тр.х}} = F_{\text{тр.х1}} + F_{\text{тр.х2}} + F_{\text{тр.х3}} + F_{\text{тр.х4}}$.

Здесь сила трения $F_{\text{тр.х}}$ направленная противоположно оси Ox_1 , учитывает трение качения колес о поверхности катания рельсовых нитей $F_{\text{т}} = F_{\text{тр.к}}$ и трение скольжения гребней колес по боковым поверхностям рельсовых нитей $F_{\text{тр.ск}}$ при воздействии поперечной переносной силы инерции $I_{\text{еу}}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{тр.б}}$ (не показаны на рис. 2 и 3), т.е. $F_{\text{тр.х}} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{тр.ск}}$.

СИЛОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Силовые соотношения на рассматриваемом участке горки аналогично [7–9] находим в следующей последовательности.

1. Определяем проекции силы аэродинамического сопротивления $F_{\text{рв}}$ действующие и вдоль, и поперек вагона, в виде $F_{\text{рвх}}$ и $F_{\text{рвы}} = F_{\text{рвб}}$ кН:

$$F_{\text{рвх}} = 0,5 A_{\text{т}}; F_{\text{рвб}} = 0,5 A_{\text{б}}, \quad (2)$$

где 0,5 — удельное давление на 1 м² площади, кН/м²;

$A_{\text{т}}$ и $A_{\text{б}}$ — соответственно площадь торцевой и боковой поверхности вагона с грузом, м².

2. Вычисляем все силы, действующие на вагон, кН:

сдвигающие силы $F_{\text{сд.х1}}$, т.е. проекцию силы тяжести вагона с грузом $G_{\text{х}}$ и силы воздействия попутного ветра $F_{\text{рвх}}$ на направление скатывания вагона по оси Ox_1 :

$$F_{\text{сд.х1}} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \cos(\psi_{0k}); \quad (3)$$

удерживающие силы $F_{\text{удк.х1}}$, т.е. силы сопротивления движению вагона в виде сопротивления встречного ветра $F_{\text{рвх}}$, трения качения колесных пар $F_{\text{тр.к}}$ и скольжения гребней колес о боковые поверхности рельсовой нити $F_{\text{тр.ск}}$ (с учетом воздействия поперечной переносной силы инерции $I_{\text{еу}}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{рвб}}$), силы сопротивления движению всякого рода $F_{\text{ср}}$ направленные противоположно оси Ox_1 :

$$F_{\text{удк.х1}} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{с}} + F_{\text{тр.ск}}, \quad (4)$$

причем, в отличие от [8],

$$F_{\text{с}} = F_{\text{ср}} + F_{\text{стр}} + F_{\text{с.и}} + F_{\text{кр}}. \quad (5)$$

В (4) и далее $k = 4$ соответствует отсутствию воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона на втором скоростном участке горки до стрелки, $k = 41$ — учету такого воздействия; $k = 4с$ соответствует отсутствию воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона после стрелки, $k = 41с$ — учету такого воздействия; $k = 42с$ соответствует учету воздействия поперечной переносной силы инерции и проекции ветра с боковой стороны вагона.

Перепишем (4) с учетом (5):

$$F_{\text{удк.х1}} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{ср}} + F_{\text{стр}} + F_{\text{с.и}} + F_{\text{кр}} + F_{\text{тр.ск}}. \quad (6)$$

Каждое слагаемое, входящее в (6), находим по формулам:

$$F_{\text{тр.к}} = f_0 [G \cos(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \sin(\psi_{0k})]; \quad (7)$$

$$F_{\text{ср}} = k_{\text{ср}} G; F_{\text{стр}} = k_{\text{стр}} G; F_{\text{с.и}} = k_{\text{с.и}} G; F_{\text{кр}} = k_{\text{кр}} G; \quad (8)$$

$$F_{\text{тр.ск}} = f_{\text{ск0}} [I_{\text{еу}} + F_{\text{рвб}} \cos(\alpha_4)], \quad (9)$$

где f_0 — некоторый условный коэффициент трения скольжения, учитывающий количество колес в тележках, трение качения по кольцам подшипника и колеса по рельсу (согласно расчетным данным — обычно порядка 0,0001) [11, 12];

$k_{\text{ср}}$ — коэффициент, показывающий долю силы тяжести G при учете сопротивления среды [16];

$k_{\text{стр}}$, $k_{\text{с.и}}$ и $k_{\text{кр}}$ — коэффициенты, показывающие долю силы тяжести G при учете сопротивления движению вагона от ударов на стрелочных переводах, от снега и инея и от кривых [16];

$f_{\text{ск0}}$ — коэффициент трения скольжения гребней колес о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают равным 0,25) [6, 7];

$I_{\text{еу}}$ — поперечная переносная сила инерции, определяемая как $I_{\text{еу}} = k_{\text{дв}} G$, где $k_{\text{дв}}$ — коэффициент поперечной динамики вагона (ориентировочно принимают до 0,03);

α_4 — угол поворота кривых на промежуточном участке горки (принимают в зависимости от количества путей на горочной горловине, например, если горловина спроектирована на 24-м или 32-м пути, то $\alpha_4 = 10,68^\circ$ или $12,23^\circ$, а если на 40-м, то $\alpha_4 = 13,63^\circ$ [15]).

Коэффициенты $k_{\text{ср}}$, $k_{\text{стр}}$, $k_{\text{с.и}}$ и $k_{\text{кр}}$ обычно принимают ориентировочно, а затем вводят коэффициент $k_{\text{нв}}$ уточняющий вычисления. Например, $k_{\text{стр}} = 0,0025$ (допускается принять и другую величину), $k_{\text{с.и}} = 0,0001$ – $0,0004$; $k_{\text{кр}} = 0,0031$ [16].

Подставляя (7)–(9) в (6), силу $F_{\text{удк.х1}}$, в отличие от [8], представим в виде

$$F_{\text{удк.х1}} = f_0 [G \cos(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \sin(\psi_{0k})] + (k_{\text{ср}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{с.и}} + k_{\text{кр}}) k_{\text{нв}} G + f_{\text{ск0}} [I_{\text{еу}} + F_{\text{рвб}} \cos(\alpha_4)]. \quad (10)$$

Особо отметим, что движение вагона на рассматриваемом участке горки возможно лишь при соблюдении условия [11]

$$F_{\text{сд.х1}} > F_{\text{удк.х1}}.$$

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СИЛЫ НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Будем иметь в виду, что сила трения качения $F_{\text{тр.к}}$ (как основное сопротивление), сила сопротивления движению вагона от среды $F_{\text{ср}}$ и сила трения скольжения при учете проекции ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{тр.б}}$ действуют на систему «вагон — груз» при движении на втором скоростном участке за время t , а силы сопротивления движению вагона от стрелок $F_{\text{стр}}$ и от кривых $F_{\text{кр}}$ (как дополнительное сопротивление), сила трения скольжения $F_{\text{тр.ск}}$ при учете воздействия поперечной

переносной силы инерции I_{ey} снега и инея $F_{с.и}$ (как эпизодическое сопротивление) — с задержкой на величину t_0 , т.е. $t > t_0$. Поэтому, как и ранее, движение вагона разделим на два этапа: на первом вагон после выхода из первого скоростного участка движется до стрелки за время t_k со скоростью v_k , а на втором — от стрелки по кривым второго скоростного участка до начала первой тормозной позиции за время t_{kc} со скоростью v_{kc} . Причем удерживающую силу $F_{удк.x1}$ на первом этапе определим, в отличие от (10), по формуле

$$F_{удк.x1} = F_{тр.к} + F_{сп} + F_{тр.ск}, \quad (10a)$$

или

$$F_{удк.x1} = f_0 [G \cos(\psi_{0k}) + F_{рх} \sin(\psi_{0k})] + k_{сп} k_{нв} G + f_{ск0} F_{рб}, \quad (10б)$$

а силу $F_{удк.x1}$ на втором этапе — по формуле (10).

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Аналогично [8–12], используя основной закон динамики с неидеальными связями, или принцип Д'Аламбера в координатной форме [14], и подставляя в него (3) и (10), получаем

$$M \frac{dv}{dt} = F_{сд.x1} - F_{удк.x1}, \quad (11)$$

где M — масса груженого (или порожнего) вагона с учетом инерции вращающихся масс (колесных пар), кг.

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Как и в [7, 8], перепишем (11) в виде дифференциального уравнения движения вагона на рассматриваемом участке горки:

$$M \frac{dv}{dt} = F_k, \quad (12)$$

где $F_k = (F_{сд.x1} - F_{удк.x1}) > 0$, Н.

Начальные условия задачи Коши: если $t = 0$, то $v(0) = v_0$, где $v_0 = v_{0k}$ — скорость входа вагона на второй скоростной участок горки.

Разделив переменные в (12) и взяв интегралы от обеих частей последнего равенства, после интегрирования получим известную формулу скорости тела при равноускоренном движении:

$$v_{ek}(t) = v_{0k} + a_k t, \quad (13)$$

где a_k — ускорение, при котором происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона в зависимости от величины сил сопротивления, $м/с^2$,

$$a_k = \frac{|F_k|}{M}. \quad (14)$$

Уравнения (12) и (14) представляют собой идентичные математические выражения второго закона Ньютона при абсолютном движении: в результате воздействия на тело с массой M внешней силы F_k , имеющей постоянную величину, данное тело совершает прямолинейное равноускоренное движение с ускорением a_k .

Из (11) очевидно, что ускорение a_k следует определить в соответствии с временем прохождения вагона отдельно до стрелки t_k , а затем — от стрелки по кривому участку пути за время t_{kc} до конца второго скоростного участка.

Анализируя (14), отметим, что вагон на втором скоростном участке горки при воздействии попутного ветра совершает прямолинейное равноускоренное движение. При этом ускорение a_k зависит от всех сил, действующих на систему «вагон — путь»: $F_{сд.x1} = f(G)$ и $F_{удк.x1} = f(F_{рх}, F_{тр.к}, F_{сп}, I_{ey}, F_{рб})$, а также от массы груженого (или порожнего) вагона M с учетом инерции вращающихся масс, т.е. $a_k = f(M, F_{сд.x1}, F_{удк.x1})$.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ И СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Итак, на рассматриваемом участке горки скорость вагона $v_{ek}(t)$ или $v_{ekc}(t)$ в течение времени t при воздействии попутного ветра описывается по линейно-возрастающему закону (13) в зависимости от величины сил сопротивления до и после стрелки. Таким образом, вагон быстро набирает скорость.

Очевидно, что скорость $v_{ek}(t)$ зависит от начальной скорости v_0 и ускорения вагона a_k , т.е. $v_{ek}(t) = f(v_{0k}, a_k, t)$.

Далее, как и в [8], учитывая, что $v_e(t) = \frac{dx}{dt}$, перепишем (13) в виде дифференциального уравнения ускоренного движения вагона:

$$\frac{dx}{dt} = v_{0k} + a_k t.$$

Начальные условия задачи Коши: если $t = 0$, то $x(0) = 0$.

Умножая обе части последнего равенства на dt и интегрируя полученное уравнение в пределах от 0 до t , окончательно определим пройденное вагоном расстояние (путь) в течение времени t на рассматриваемом участке горки, м:

$$x_j(t) = v_{0k} t + \frac{1}{2} a_k t^2. \quad (15)$$

Здесь и далее $j = 4$ соответствует случаю, когда $k = 4$; 41; 42, а $j = 4с$ — когда $k = 4с$; 41с; 42с.

Анализируя (15), убеждаемся, что $x_j(t)$ в течение времени t зависит от начальной скорости v_{0k} и ускорения вагона a_k , т.е. $x_j(t) = f(v_{0k}, a_k, t)$. Примем, что если $t = t_k$, то $x_j(t_k) = l_j$.

Как видно из выражения (15), при $t = 0$ будем иметь $x = 0$, т.е. начальное условие задачи соблюдается.

Отметим, что (13) и (15) представляют собой хорошо известные из курса физики формулы скорости и пути при ускоренном движении тела.

По уравнению (15) можно найти время t_k (в секундах), в течение которого вагон прямолинейно равноускоренно движется на данном участке горки, имеющем длину $l_j = x_j(t_k)$:

$$t_k = \frac{-v_{0k} + \sqrt{v_{0k}^2 + 2a_k l_j}}{a_k}. \quad (16)$$

Анализ (16) показывает, что время t_k , в течение которого вагон проходит рассматриваемый участок, зависит от скорости v_{0k} , ускорения a_k и длины l_j , т.е. $t_k = f(v_{0k}, a_k, l_j)$.

Тогда, используя (16), по (13) найдем скорость вагона в конце второго скоростного участка горки $v_{ek}(t_k)$.

Решая совместно (13) и (15), получим зависимость скорости скатывания вагона от длины второго скоростного участка горки:

$$v_{ek}(t) = \sqrt{v_{0k}^2 + 2a_k l_j}. \quad (17)$$

Обычно (17) используется для построения графической зависимости $v_{ek}(l_k)$.

Таким образом, с использованием основного принципа Д'Аламбера и классических формул скорости и пути, как и в [7, 8], получаем конечные аналитические формулы для определения времени t_k и скорости вагона $v_{ek}(t_k)$ до и после стрелки второго скоростного участка сортировочной горки.

ВЫВОДЫ

1. На основе классических положений теоретической механики получены упрощенные математические модели ско-

рости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии силы тяжести вагона с грузом (или без груза) и попутного ветра малой величины, а также сил сопротивления, возникающих при движении системы «вагон — путь».

2. Установлено, что вагон на промежуточном участке горки совершает прямолинейное равноускоренное движение. При этом кроме сил сопротивления всякого рода (среды, стрелок, кривых, снега и инея, ветра) учитывается также воздействие поперечной переносной силы инерции и ветра с боковой стороны вагона. Ускорение a_k на промежуточном участке горки зависит от всех сил, действующих на систему «вагон — путь», и от массы груженого (или порожнего) вагона M с учетом инерции вращающихся масс, т.е. $a_k = f(M, F_{сд.х1}, F_{удк.х1})$.

3. С использованием уравнения, описывающего расстояние, пройденное вагоном на втором скоростном участке сортировочной горки, получена упрощенная формула для определения времени движения вагона на этом участке. Установлено, что время t_k , в течение которого вагон движется на рассматриваемом участке горки, зависит от начальной скорости v_{0k} , ускорения вагона a_k и длины участка l_j , т.е. $t_k = f(v_{0k}, a_k, l_j)$.

4. На основе формулы времени движения вагона на втором скоростном участке сортировочной горки определена скорость скатывания вагона в конце проектируемого участка. Установлено, что скорость скатывания вагона $v_{ek}(t)$ в течение времени t зависит от начальной скорости v_{0k} и ускорения a_k , т.е. $v_{ek}(t) = f(v_{0k}, a_k, t)$. Также получена упрощенная формула зависимости скорости скатывания вагона от длины второго скоростного участка сортировочной горки $v_{ek}(l_k)$.

Результаты представленных исследований могут быть использованы при выполнении уточненного расчета скорости скатывания вагона по участку первой тормозной позиции сортировочной горки.

Литература

1. Туранов Х.Т., Гордиенко А.А. Математическая модель времени скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 6 (240). С. 16–21. ISSN 2072–8115.
2. Туранов Х.Т., Гордиенко А.А. Аналитическое определение времени скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Наука и техника транспорта. 2015. № 2. С. 73–81. ISSN 2074–9325.
3. Туранов Х.Т., Гордиенко А.А. Определение времени и скорости скатывания вагона перед первой горочной тормозной позицией сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 7. С. 25–30. ISSN 0236–1914.
4. Туранов Х.Т., Гордиенко А.А. Пример расчета времени и скорости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике // Наука и техника транспорта. 2015. № 3. С. 73–80. ISSN 2074–9325.

References

1. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Matematicheskaya model vremeni skatyvaniya vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [Mathematical model of the time required for a car to roll down on the first high-speed hump section when exposed to light tailwind] // Byulleten transportnoy informatsii. 2015. № 6 (240). S. 16–21. ISSN 2072–8115.
2. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Analiticheskoe opredelenie vremeni skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [Analytical determination of the time of car rolling down on the second high-speed hump section when exposed to light tailwind] // Nauka i tekhnika transporta. 2015. № 2. S. 73–81. ISSN 2074–9325.
3. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Opredelenie vremeni i skorosti skatyvaniya vagona pered pervoy gorochnoy tormoznoy pozitsiei sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [Determining time and speed of a car rolling down before the first braking position of a hump when exposed to light tailwind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 7. S. 25–30. ISSN 0236–1914.
4. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Primer raschyota vremeni i skorosti skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny po novoy metodike [An example of calculation of time and speed of the car rolling down on the second high-speed hump section when exposed to light tailwind using

5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчета времени и скорости скатывания вагона перед первой тормозной позицией сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 9. С. 15–19. ISSN 0236–1914.
6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Новая методика расчета времени и скорости скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 10 (244). С. 14–22. ISSN 2072–8115.
7. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Новая методика расчета времени и скорости вагона при его движении на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 11. С. 26–30. ISSN 0236–1914.
8. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Математическое описание движения вагона с торможением на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 10–15. ISSN 1815–9400. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-10-15.
9. Turanov Kh. The dynamics of the wagon rolling down the hump profile under the impact of fair wind // Direct Research Journals of Engineering and Information Technology (DRJEIT). 2014. May. Vol. 2 (2). P. 17–24. ISSN 2354–4155 [Электронный ресурс]. URL: <http://directresearchpublisher.org/drjet/archive/2014/May/pdf/Turanov.pdf> (дата обращения: 17.09.2015).
10. Turanov K., Gordienko A. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles // Open Access Library Journal. 2015. Vol. 2. e1912. P. 1–11 [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912> (дата обращения: 17.09.2015).
11. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Уточненные математические модели скорости скатывания вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 1. С. 15–21. ISSN 0236–1914.
12. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Упрощенные математические модели движения вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 3. С. 20–24. ISSN 0236–1914.
13. Кобзев В. А., Шмаль С. Н. Особенности расчета спускной части сортировочных горок методом покоординатного спуска // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 17–20. ISSN 2074–9325.
14. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.
15. Земблинов С. В., Страковский И. И. Альбом схем элементов станций и узлов. М.: Всесоюз. изд.-полиграфическое об-ние МПС, 1963. 89 с.
16. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II. М.: Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
- a new method] // Nauka i tekhnika transporta. 2015. № 3. S. 73–80. ISSN 2074-9325.
5. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Primer raschyota vremeni i skorosti skatyvaniya vagona pered pervoy tormoznoy pozitsiei sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny po novoy metodike [An example of calculation of time and speed of the car rolling down before the first braking position of hump when exposed to light tailwind using a new method] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 9. S. 15–19. ISSN 0236-1914.
6. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Novaya metodika raschyota vremeni i skorosti skatyvaniya vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [A new method of calculation of time and speed of the car rolling down on the first high-speed hump section when exposed to light tailwind] // Byulleten transportnoy informatsii. 2015. № 10 (244). S. 14–22. ISSN 2072-8115.
7. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Novaya metodika raschyota vremeni i skorosti vagona pri ego dvizhenii na uchastke pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra [A new method of calculation of time and speed of the car rolling down on the first braking hump section when exposed to tailwind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 11. S. 26–30. ISSN 0236-1914.
8. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhovich I. S. Matematicheskoe opisanie dvizheniya vagona s tormozheniem na uchastke pervoy tormoznoy pozitsii sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloy velichiny [Mathematical description of car movement with braking on the first position of gravity hump at light tailwind] // Transport of the Urals. 2015. № 4 (47). S. 10–15. ISSN 1815-9400. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-10-15.
9. Turanov Kh. The dynamics of the wagon rolling down the hump profile under the impact of fair wind // Direct Research Journals of Engineering and Information Technology (DRJEIT). 2014. May. Vol. 2 (2). P. 17–24. ISSN 2354-4155 [Electronic resource]. URL: <http://directresearchpublisher.org/drjet/archive/2014/May/pdf/Turanov.pdf> (date accessed: 17.09.2015).
10. Turanov K., Gordienko A. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles // Open Access Library Journal. 2015. Vol. 2. e1912. P. 1–11 [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912> (date accessed: 17.09.2015).
11. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Utochnyonnye matematicheskie modeli skorosti skatyvaniya vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tyazheshti i poputnogo vetra [Refined mathematical model of rolling speed of rail car moving downgrade on hump under the influence of gravity and back wind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 1. S. 15–21. ISSN 0236-1914.
12. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Uproshchyonnye matematicheskie modeli dvizheniya vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tyazheshti i poputnogo vetra [Simplified mathematical model of a car moving on the slope under the influence of gravity and tailwind] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 3. S. 20–24. ISSN 0236-1914.
13. Kobzev V. A., Shmal S. N. Osobennosti raschyota spusknoy chasti sortirovochnykh gorok metodom pokoordinatnogo spуска [Specifics of the analysis of the descent part of humps using coordinate-wise method] // Nauka i tekhnika transporta. 2014. № 1. S. 17–20. ISSN 2074-9325.
14. Loytsyanskiy L. G., Lurie A. I. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. II. Dinamika [Course of theoretical mechanics. Vol. 2. Dynamics]. M.: Nauka, 1983. 640 s.
15. Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Albom skhem elementov stantsiy i uzlov [Album of diagrams of station and junction elements]. M.: Vsesoyuz. izd.-poligraficheskoe ob-nie MPS, 1963. 89 s.
16. Obrastsov V. N. Stantsii i uzly. Ch. II [Stations and junctions. Part II]. M.: Transzheldorizdat, 1938. 492 s.

УДК 681.518.5+656.05

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,
 Герман Владимирович Осадчий, технический директор ЗАО НТЦ «Мониторинг мостов», Санкт-Петербург,
 Дмитрий Владимирович Седых, инженер ООО «Мостовое бюро», Санкт-Петербург,
 Владимир Леонидович Иванов, кандидат технических наук, декан факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург,
 Михаил Евгеньевич Медведев, главный инженер службы электрификации и электроснабжения Октябрьской дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД», Санкт-Петербург,
 Геннадий Федорович Насонов, заместитель начальника Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» (по развитию системы управления), Москва,
 Юрий Анатольевич Черногооров, главный инженер Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» (ЦДИ), Москва

СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА МЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИЯ В ПРОВОДАХ И ТРОСАХ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

Dmitriy Viktorovich Efanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automation and Telemechanics on the Railway, Petersburg State Transport University (PSTU), Saint-Petersburg,
 German Vladimirovich Osadchiy, Technical Director, Monitoring Mostov CJSC NTC, Saint-Petersburg,
 Dmitriy Vladimirovich Sedykh, Engineer, Mostovoye Buro LLC, Saint-Petersburg,
 Vladimir Leonidovich Ivanov, PhD in Engineering, Dean of Department of Cryogenic Techniques and Air Conditioning, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint-Petersburg,
 Mikhail Evgenyevich Medvedev, Chief Engineer, Electrification and Power Supply Department, Oktyabrskaya Infrastructure Directorate — a branch of JSC Russian Railways, Saint-Petersburg,
 Gennadiy Fyodorovich Nasonov, Deputy Chief, Central Infrastructure Directorate — a branch of JSC Russian Railways (for management system development), Moscow,
 Yuriy Anatolyevich Chernogorov, Chief Engineer, Central Infrastructure Directorate — a branch of JSC Russian Railways (CID), Moscow

A method for continuous monitoring of mechanical tension in catenary wires and cables

Аннотация

Рассмотрен способ измерения механического усилия в тросах и проводах контактной подвески, направленный на расширение функциональных возможностей системы удаленного контроля и мониторинга технического состояния контактной сети (СДУМ КС). Предлагаемый способ основан на непрерывном мониторинге изменения усилия натяжения тросов и проводов контактной подвески, влияющего как на ее состояние, так и на качество токосъема. Отмечены диагностические ситуации (предотказы и отказы), которые можно фиксировать с помощью получаемых измерений. Описан диагностический прибор на основе тензодатчика, позволяющий в совокупности с уже входящими в состав СДУМ КС датчиками значительно повысить эффективность определения состояния контактной подвески. С целью получения полноценной диагностической информации для анкерного участка перегона Любань — Рябово Октябрьской железной дороги экспериментально установлены места подключения диагностических приборов и минимизировано количество последних.

Ключевые слова: техническая диагностика, мониторинг, энергоснабжение, токоприемник, контактная сеть, беспроводная передача данных, радиоканал, предотказное состояние.
 DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-9-15

Summary

A method for measuring mechanical stress in catenary wires and cables has been studied, intended to expand the functionality of the system of remote monitoring of trolley line technical state (SRMTLTS). The proposed method is based on continuous monitoring of changes in tensile force of catenary cables and wires, affecting both its condition and quality of current collection. Diagnostic situations have been noted (pre-failures and failures) that can be determined using the measurements obtained. A diagnostic tool has been described based on a load cell, which in combination with sensors included in SRMTLTS significantly increase the efficiency of determining the condition of catenary. In order to obtain a full diagnostic information for the tension length of Lyuban — Ryabovo section of October Railways, points of connection of diagnostic devices have been experimentally established and the number of devices minimized.

Keywords: technical diagnostics, monitoring, power supply, current collector, contact network, wireless data transmission, radio, pre-failure state.
 DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-9-15

Мониторинг объектов инфраструктуры в ОАО «РЖД» имеет фундаментальное значение для обеспечения безопасного и безостановочного пропуска поездов, особенно при создании высокоскоростных магистралей и организации тяжеловесного движения. Системы мониторинга позволяют своевременно оценивать техническое состояние эксплуатируемых устройств, прогнозировать его ухудшение, фиксировать так называемые предотказные состояния, предотвращать отказы диагностируемых объектов, а следовательно, снижать риск, связанный с простоем поездов, возникновением происшествий, аварий и катастроф [1, 2]. Более того, средства удаленного контроля и мониторинга способны автоматизировать процесс обслуживания диагностируемых объектов и тем самым снизить влияние человеческого фактора на этот процесс.

Для объектов железнодорожной инфраструктуры, к которым относится большое количество устройств и сооружений, начиная от мостов, путепроводов, самого пути и переездов и заканчивая контактной сетью и напольным технологическим оборудованием железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), мониторинг служит действенным способом обеспе-

чения высокого уровня отказоустойчивости при отсутствии 100 %-го резервирования [3, 4]. Все эти объекты функционируют в комплексе, в постоянном взаимодействии друг с другом и с подвижным составом. Соответственно отказы в любом из элементов инфраструктуры крайне негативно влияют на перевозочный процесс.

В отдельном фокусе средств инфраструктуры ОАО «РЖД» находится контактная сеть, функционирующая в тяжелых климатических условиях и подверженная воздействию температуры, силы ветра, снегопадов и т. д. Большое количество неисправностей контактной сети связано с неисправностями контактной подвески (более 75 % отказов). К частым отказам относятся износ контактного провода, провисание подвески, обрывы струн и т. д. В настоящее время системы комплексного непрерывного мониторинга контактной подвески на железных дорогах Российской Федерации отсутствуют. Для диагностирования элементов контактной подвески используются такие способы, как оценка износа и провисания проводов с помощью видеосъемки [5], определение степени износа контактного провода на основе применения матричных вихретоковых преобразователей, устанавливаемых на токосъемной лыже вагона-лаборатории [6], регистрация высоты контактного провода оптическим устройством, размещаемым на токоприемнике подвижной единицы [7], и т. д.

В данной статье рассматривается способ расширения функциональных возможностей разработанной и совершенствуемой СДУМ КС [8, 9], основанный на организации непрерывного мониторинга механического усилия в тросах и проводах контактной подвески.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ МИРА

Непрерывный мониторинг как эффективный способ поддержания высокого уровня отказоустойчивости контактной сети применяется на железных дорогах многих стран мира [10–14]. Например, во Франции контактная сеть на высокоскоростном сообщении снабжается средствами мониторинга CAT IRIS [10], включающими в себя четыре электромагнитные педали, расположенные на входе и выходе зоны контроля (счетчик осей), метеорологические датчики и датчики поднятия контактного провода. В момент движения поезда CAT IRIS фиксирует поднятие контактного провода под воздействием пантографа, а информацию о достижении недопустимых уровней передает сначала в измерительную будку, а затем в ситуационный центр мониторинга. Эта система помимо диагностической информации о состоянии контактного провода передает также данные о скорости поезда, скорости и направлении ветра и т. п.

На линиях Кельн — Франкфурт (Германия), Мадрид — Севилья — Вальядолид (Испания) и HSL-Zuid (Нидерланды) действует система мониторинга контактной сети Sicat CMS фирмы Siemens (рис. 1). Sicat CMS, так же как CAT IRIS, использует магнитные датчики и, в отличие от последней, качающийся рычаг, по отклонению которого можно фиксировать изменения натяжений несущего троса и контактного провода [11]. На качающемся рычаге блока компенсатора барабанного типа устанавливается датчик, который следит за всеми перемеще-

ниями рычага, т. е. за изменениями усилий, происходящими в контактной подвеске. Система состоит из датчиков, станций приема и передачи данных, станции оценки данных, оптоволоконных сетей и электроснабжения.

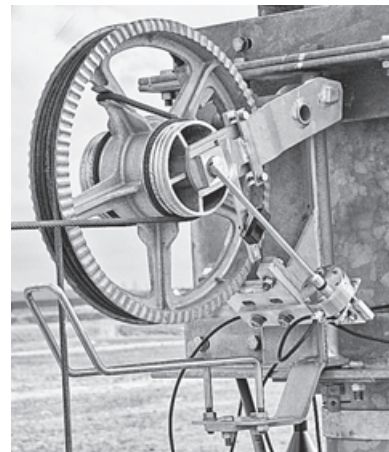


Рис. 1. Система Sicat CMS (датчик перемещения вращающегося рычага изображен справа)

На линии Чунгбук (Корея) применяется система мониторинга, базирующаяся на использовании акселерометров, тензометров и пр., которые размещаются в местах крепления контактного провода к фиксаторам [12]. Все оборудование, определяющее изменение параметров контактной подвески, устанавливается на каждой консоли и представляет собой набор большого количества приборов и датчиков.

На пространстве железных дорог Российской Федерации описанные технические решения неприменимы ввиду отличия используемых конструкций контактной подвески. Поэтому требуются отечественные разработки в области совершенствования системы удаленного контроля и мониторинга контактной сети. До 2011 г. Россия была единственной страной в мире, имеющей и активно развивающей скоростное и высокоскоростное движение, но при этом не располагающей собственной системой непрерывного мониторинга контактной сети.

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Разработка СДУМ КС началась в 2011 г. по заданию старшего вице-президента ОАО «РЖД» В. А. Гапановича. В 2012 г. новой системой мониторинга был оборудован опытный участок, включающий в себя два анкерных участка по 1-му и 2-му путям в створе между станциями Рябово и Любань Октябрьской железной дороги (скоростная магистраль Санкт-Петербург — Москва).

Структура организации передачи данных СДУМ КС представлена на рис. 2. СДУМ КС имеет многоуровневую иерархическую структуру и включает в себя подсистемы:

- сбора и первичной обработки диагностической информации;
- беспроводной передачи данных в центр мониторинга;
- энергоснабжения и автономного питания диагностических приборов.

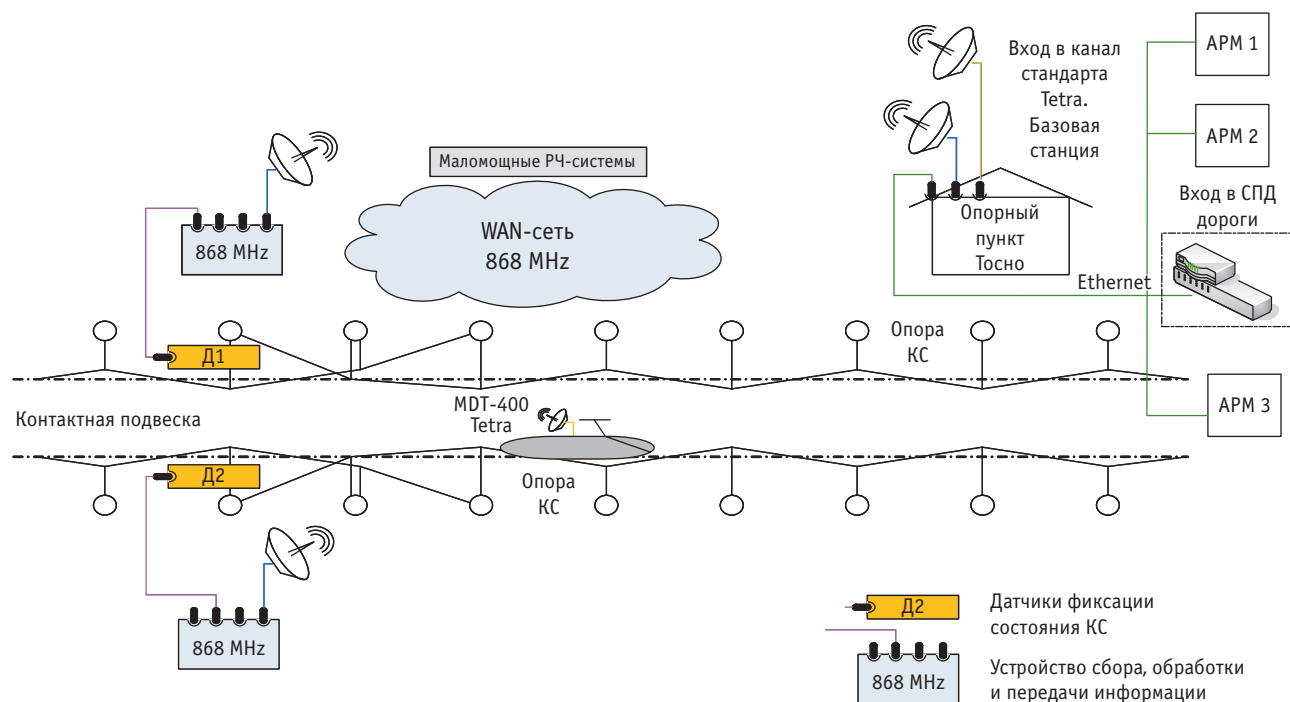


Рис. 2. Организационная структура СДУМ КС

Работая в масштабе реального времени, СДУМ КС определяет состояние контактной подвески и передает диагностическую информацию в центр диагностирования и мониторинга хозяйства электрификации и энергоснабжения (ЦДМЭ), а также в центр управления содержанием инфраструктуры (ЦУСИ).

По сравнению с корейским аналогом СДУМ КС имеет следующие технические особенности, связанные с условиями эксплуатации на железных дорогах Российской Федерации:

- диапазон рабочих температур от -40 до $+50$ °C;
- автономная работа и от солнечных батарей с аккумулятором, и от одноразовых батарей;

- беспроводная сеть передачи данных на частоте 868,7 МГц, отличной от формата передачи данных ZigBee;

- узловой принцип топологии, который дает возможность менять маршрут передачи информации и повышать надежность системы передачи данных;

- крепление датчиков к объекту диагностирования через элемент, который позволяет выполнять мероприятия по техническому обслуживанию системы мониторинга без удаления закладной детали, на которую крепится датчик (это сокращает время замены и установки датчика).

Недостатком системы СДУМ КС было то, что она определяла лишь вибрационное (динамическое) состояние с помощью специально разработанного прибора, размещаемого в контрольных точках на несущем тросе и контактом проводе (когда нет вибрационного воздействия, определить какие-либо изменения усилия было невозможно) [15].

Экспериментально показано, что для эффективного мониторинга технического состояния контактной сети на од-

ном анкерном участке необходимо разместить как минимум 6 комплектов устройств. Диагностические устройства получают и передают информацию об усилии несущего троса и контактного провода, фиксируемом непосредственно за роликами блоков компенсаторов и/или над гирляндами грузов компенсаторов, которые размещаются на анкерных опорах контактной сети, а также в других доступных для эксплуатации местах на напряженных элементах конструкции контактной подвески.

Отметим немаловажный факт: как аппаратные, так и программные компоненты СДУМ КС производятся в Российской Федерации или на локализованных на ее территории предприятиях. Стоимость оборудования одного анкерного участка системой мониторинга не превышает 5 % от стоимости капитального строительства контактной сети.

СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

При разработке СДУМ КС возникла проблема организации тракта передачи диагностической информации. По согласованию с ОАО «РЖД» и с учетом рекомендаций управляющего аппарата компании был использован радиоканал с частотой 868,7 МГц. При этом в зависимости от особенностей анкерного участка диагностическая информация может быть передана в концентратор напрямую или через ретрансляторы сигналов. Тем не менее технически предусмотрена передача данных и по проводным волоконно-оптическим каналам.

Для оптимальной передачи данных создан собственный протокол, который в связке с разработанной аппаратной частью позволяет достичь уникальных технических характеристик:

высокой энергетической эффективности (до 1,5 лет работы от автономных источников питания при температуре от -40 до $+50$ °С);

настройки маршрутов передачи данных до концентраторов системы по различным сценариям — через ретрансляторы сигнала, соседние датчики, напрямую к концентратору и т. д.; автоматического динамического перестроения маршрутов в случае отказа отдельных узлов сети; возможна отправка данных через соседние ретрансляторы и даже через соседние датчики, которые временно становятся ретрансляторами для передачи сообщений.

При передаче данных расстояние между датчиками может достигать 2 км. Скорость передачи данных позволяет обрабатывать информацию от 250 датчиков с использованием двух концентраторов. Система имеет резервы по увеличению скорости и дальности передачи данных путем перехода на другие мощностные характеристики и при использовании более высоких частот радиопередающего модуля.

Так как тракт передачи данных между источником информации (датчиком) и концентратором использует свой протокол и объекты функционируют в условиях электромагнитных помех, задача обеспечения достоверной передачи информации становится особенно актуальной. К тому же сам трафик обладает рядом особенностей — должны учитываться скорость передачи, объем данных и топология сети. В свою очередь, диагностический прибор, работающий от автономного источника, требует минимизации энергозатрат. Это накладывает ограничения на длину пакета передаваемого сообщения и на способ обеспечения надежной передачи информации. В данном исследовании задача была решена на основе использования специально разработанных кодов с суммированием с высокой кодовой скоростью и обнаружением максимального количества ошибок малых кратностей в информационных векторах [16, 17].

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ СДУМ КС

Структурная схема блока сбора и передачи информации СДУМ КС представлена на рис. 3. Каждый такой блок содержит комплект датчиков, включающий в себя датчик тензометрии, соединенный с блоком отдельным кабелем (рис. 4), автономный источник питания, микропроцессорное устройство для первичной аналого-цифровой обработки информации с датчиков блока, устройство радиосвязи между блоком и размещаемым на узловой станции промежуточным концентратором информации, который соединен проводной и/или беспроводной связью с единым концентратором информации о состоянии элементов контактной сети железной дороги. Модульный принцип построения блока сбора информации обеспечивает подключение к нему новых измерительных приборов без внесения изменений в конструкцию самого блока.

При изменении механического усилия (вынуждающей силы) происходит деформация твердого тела, вызываемая механическими напряжениями, которые преобразуются в электрический сигнал, предназначенный для последующей передачи, преобразования и регистрации. В настоящее время разработано большое количество датчиков измерения механического

напряжения. Наибольшее распространение получили тензодатчики сопротивления, реализованные на основе тензорезисторов. В СДУМ КС использован тензодатчик Н922 (рис. 5), характеристики которого подходят для решаемой задачи [18].

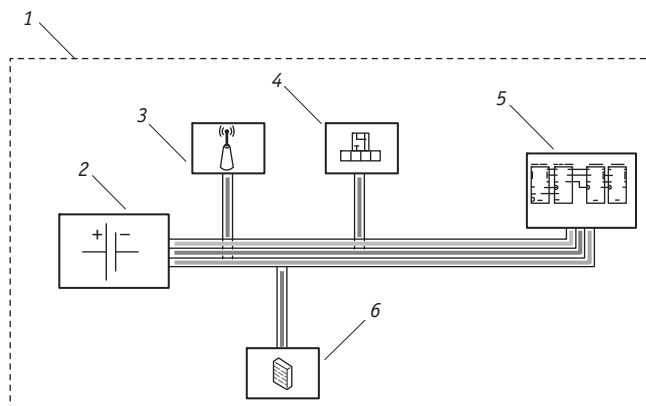


Рис. 3. Структура блока сбора и обработки информации:

- 1 — блок сбора и передачи информации; 2 — автономный источник питания; 3 — устройство радиосвязи; 4 — тензодатчик; 5 — микропроцессорное устройство; 6 — элемент сопряжения с системой передачи данных (СПД)



Рис. 4. Диагностические приборы на участке скоростного движения Санкт-Петербург — Москва



Рис. 5. Внешний вид тензодатчика Н922

Блок сбора и передачи информации в диагностическом устройстве осуществляет анализ параметров с частотой до 400 раз в секунду, регистрируя измеренные значения. С помощью микропроцессорного устройства, входящего в этот блок, происходит первичная обработка информации с датчика тензометрии и управление диагностическим прибором.

Датчиками механического усилия в СДУМ КС фиксируются следующие дефекты и события:

полный обрыв несущего троса и контактного провода (отказ);
ненормативная работа компенсатора (предотказное состояние);

ненормативные усилия в проводах и тросах контактной подвески (предотказные состояния);

протоколирование выполнения работ по техническому обслуживанию (контроль факта технического обслуживания).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время описываемый диагностический прибор эксплуатируется, ведется сбор статистики для аналитического контроля состояния контактной сети по результатам работы системы на участке Любань — Рябово Октябрьской железной дороги (скоростная магистраль Санкт-Петербург — Москва), чтобы установить номинальные значения для датчиков системы по определяемым событиям.

На рис. 6 представлен график зависимости усилия натяжения троса от его нагрузки. Данные получены по результатам полевых исследований качества работы диагностических приборов на анкерном участке перегона Рябово — Любань 17 сентября 2015 г. Параметры участка приведены в табл. 1.

В ходе эксперимента зафиксировано значение усилия натяжения несущего троса во времени при последовательном снятии двух грузов. Как и следовало ожидать, значение натяжения троса уменьшилось сначала на величину 2×750 Н (см. рис. 6). По возвращении грузов тензодатчик зафиксировал два скачка значений натяжения, однако не на положенную величину, что обусловлено трением в компенсаторе.

Данные на графиках отображают значения усилия натяжения в несущем тросе, полученные путем интерпретации 24-битных значений напряжения аналого-цифрового преобразователя, подключенного к тензодатчику. Чтобы перевести эти значения в килограммы на тросе блочно-грузового компенсатора, нужно определить два значения натяжения несущего троса (измеряемые в Н) и соответствующие им значения на аналого-цифровом преобразователе.

При постановке эксперимента было необходимо:

после установки датчика зафиксировать значение натяжения W_1 (в Н) и соответствующее значение на аналого-цифровом преобразователе V_1 ;

ослабить натяжение, сняв один груз, и зафиксировать значение натяжения W_2 (в Н) и соответствующее значение на аналого-цифровом преобразователе V_2 ;

рассчитать натяжение W_x для любого значения на аналого-цифровом преобразователе V_x :

$$W_x = W_1 - (V_1 - V_x)K_w; \quad (1)$$

$$K_w = \frac{W_1 - W_2}{V_1 - V_2}. \quad (2)$$

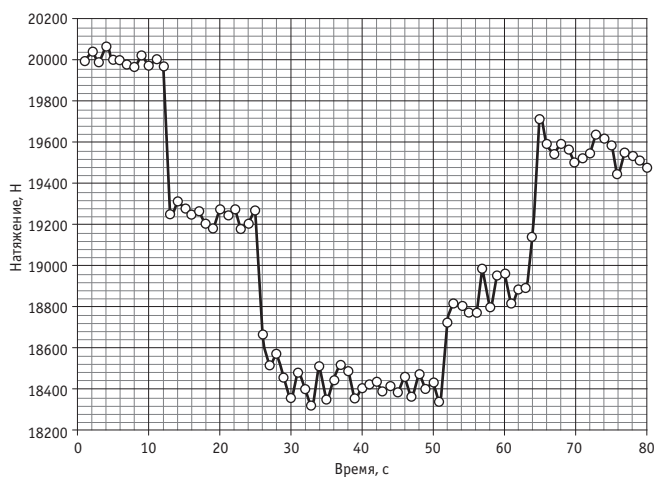


Рис. 6. Значения натяжения несущего троса при последовательном снятии и последующей постановке двух грузов компенсатора

Следует отметить, что датчики, установленные вблизи компенсаторов, только фиксируют изменение трения в них. В компенсированных подвесках натяжение троса может меняться по его длине в зависимости от температуры из-за поворота консолей. Наиболее сильно натяжение изменяется у средней анкеровки, особенно если регулировка неправильная, соответственно в этом месте ухудшается качество токосъема. Поэтому в дальнейшем для мониторинга таких явлений предполагается размещать датчики на тросе вблизи средней анкеровки.

Таблица 1

Параметры анкерного участка перегона Рябово — Любань

Перегон	Путь	Номер анкерного участка	Длина, км	Тип подвески	Марка, сечение подвески	Год монтажа		Номера анкерных опор для установки
						несущего троса	контактного провода	
Рябово — Любань	I главный путь	XIII	1,39	Компенсированная	М-120 + 2МФ-120 + 2А-185	1997	2009	7–211

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение систем мониторинга особенно актуально в связи с повышением скоростей движения как на действующих скоростных магистралях Хельсинки — Санкт-Петербург и Санкт-Петербург — Москва, так и на проектируемых Москва — Казань — Екатеринбург. Разработанный диагностический прибор, принцип действия которого основан на контроле изменения

натяжения несущего троса и контактного провода, позволяет повысить эффективность эксплуатации контактной подвески. При этом не требуется большого количества таких приборов. Использование в СДУМ КС отработанной технологии контроля механического натяжения в тросах контактной подвески — это первый шаг к созданию интеллектуального комплекса непрерывного мониторинга основных параметров контактной подвески.

Авторы выражают благодарность Александру Васильевичу Ефимову за ценные рекомендации, полезные в дальнейшей работе по созданию высокоинтеллектуальной системы непрерывного мониторинга контактной сети.

Литература

1. Сапожников Вл. В., Лыков А. А., Ефанов Д. В. Понятие предотказного состояния // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 12. С. 6–8. ISSN 0005–2329.
2. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 5. С. 67–72. ISSN 1994–831X.
3. 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.
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. ISSN 2412–9186.
5. Мобильный контрольно-диагностический комплекс / В. Г. Запужалов, В. И. Редькин, А. В. Егизарян и др. : пат. 2066645 Рос. Федерация. № 95107346/11 ; заявл. 05.05.95 ; опубл. 20.09.96.
6. Мобильный контрольно-вычислительный комплекс для диагностики контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Запужалов, В. И. Редькин, В. Е. Шатерников и др. : пат. 2108936 Рос. Федерация. № 97105206/28 ; заявл. 03.04.97 ; опубл. 20.04.98.
7. Способ контроля состояния контактного провода и устройство для его осуществления / В. П. Васильев, О. А. Лисицын : пат. 2134203 Рос. Федерация. № 95107019/28 ; заявл. 19.04.95 ; опубл. 10.08.99.
8. Система удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной сети / К. Ю. Долинский, А. А. Лыков, В. Б. Соколов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 5. С. 44–47. ISSN 1994–831X.
9. Шапиро К. С., Соколов В. А., Соколов В. Б. Системы мониторинга контактной сети на железной дороге // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 3. С. 99–107. ISSN 1815–588X.
10. Инновационная контактная сеть СНЦФ V350, испытанная скоростью свыше 500 км/ч // Евразия Вести. 2014. № 6. С. 22.
11. Überwachungseinrichtung für Oberleitungskettenwerke / J. Bechmann, A. Dolling, G. Hahn, et al. // Elektrische Bahnen. 2008. Bd 106. H. 8–9. S. 400–407.
12. Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application / Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, et al // 8th World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, 2008, 18–22 May.

References

1. Sapozhnikov V. V., Lykov A. A., Efanov D. V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [A concept of pre-failure state] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. № 12. S. 6–8. ISSN 0005–2329.
2. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustroystv ZhAT [Technical diagnostics and condition monitoring of RAT devices] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2012. № 5. S. 67–72. ISSN 1994–831X.
3. Ivanov A. A., Legonkov A. K., Molodtsov V. P. Novye pribory registratsii parametrov ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki v sisteme APK-DK (STDM) [New devices for recording railway automation equipment parameters in APC-DC system (STDM)] // Avtomatika na transporte. 2015. T. 1. № 3. S. 282–297. ISSN 2412–9186.
4. Efanov D. V. Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funktsionalnogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Development and future prospects of functional control and monitoring systems of railway automation and remote control devices] // Avtomatika na transporte. 2016. T. 2. № 1. ISSN 2412–9186.
5. Mobilniy kontrolno-diaagnosticheskiy kompleks [Mobile control and diagnostic system] / V. G. Zapuskalov, V. I. Redkin, A. V. Egizaryan i dr. : pat. 2066645 Ros. Federatsiya. № 95107346/11 ; zayavl. 05.05.95 ; opubl. 20.09.96.
6. Mobilniy kontrolno-vychislitelniy kompleks dlya diagnostiki kontaktnoy seti zheleznodorozhnogo transporta [Mobile control computer system for the diagnosis of a railway catenary] / V. G. Zapuskalov, V. I. Redkin, V. E. Shaternikov i dr. : pat. 2108936 Ros. Federatsiya. № 97105206/28 ; zayavl. 03.04.97 ; opubl. 20.04.98.
7. Sposob kontrolya sostoyaniya kontaktnogo provoda i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [A method for controlling the state of contact wire and device for its implementation] / V. P. Vasilyev, O. A. Lisitsyn : pat. 2134203 Ros. Federatsiya. № 95107019/28 ; zayavl. 19.04.95 ; opubl. 10.08.99.
8. Sistema udalonnogo monitoringa sostoyaniya zheleznodorozhnoy kontaktnoy seti [Remote monitoring system of railway catenary] / K. Yu. Dolinskiy, A. A. Lykov, V. B. Sokolov i dr. // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2010. № 5. S. 44–47. ISSN 1994–831X.
9. Shapiro K. S., Sokolov V. A., Sokolov V. B. Sistemy monitoringa kontaktnoy seti na zheleznoy doroge [Catenary monitoring systems on railway] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. 2011. № 3. S. 99–107. ISSN 1815–588X.
10. Innovatsionnaya kontaktnaya set SNTsF V350, ispytannaya skorostyu svyshe 500 km/h [Innovative contact network SNCF V350, proven speeds over 500 km/h] // Evraziya Vesti. 2014. № 6. S. 22.
11. Überwachungseinrichtung für Oberleitungskettenwerke / J. Bechmann, A. Dolling, G. Hahn, et al. // Elektrische Bahnen. 2008. Bd 106. H. 8–9. S. 400–407.
12. Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application / Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, et al // 8th World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, 2008, 18–22 May.

13. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D. Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. R 89. Nr 2. P. 154–160.
14. Video Image Analysis in Accordance with Power Density of Arcing for Current Collection System in Electric Railway / Y. Park, K. Lee, C. Park, et al. // The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. 2013. Vol. 62. Issue 9. P. 1343–1347.
15. Способ и система диагностики и удаленного мониторинга контактной сети железной дороги / В. Г. Непомнящий, Г. В. Осадчий, Д. Н. Пристенский : пат. 2444449 Рос. Федерация. № 2010137656/11 ; заявл. 07.09.10 ; опубл. 10.03.12, Бюл. № 7.
16. Sapozhnikov V., Sapozhnikov VL., Efanov D., Dmitriev V. New Sum Code for Effective Detection of Double Errors in Data Vectors // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS` 2015). Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. P. 154–159.
17. Организация систем функционального контроля комбинационных схем на основе модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов и др. // Электронное моделирование. 2015. Т. 37. № 6. С. 49–68. ISSN 0204–3572.
18. Тензодатчик H9Z2. Краткое описание / ZEMIC Russia. 2 с.

13. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D. Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. R 89. Nr 2. P. 154–160.
14. Video Image Analysis in Accordance with Power Density of Arcing for Current Collection System in Electric Railway / Y. Park, K. Lee, C. Park, et al. // The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. 2013. Vol. 62. Issue 9. P. 1343–1347.
15. Sposob i sistema diagnostiki i udalonnogo monitoringa kontaktной seti zheleznoy dorogi [The method and system for diagnosis and remote monitoring of railway catenary] / V. G. Nepomnyashchiy, G. V. Osadchiy, D. N. Pristenskiy : pat. 2444449 Ros. Federatsiya. № 2010137656/11 ; zayavl. 07.09.10 ; opubl. 10.03.12, Byul. № 7.
16. Sapozhnikov V., Sapozhnikov VL., Efanov D., Dmitriev V. New Sum Code for Effective Detection of Double Errors in Data Vectors // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS` 2015). Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. P. 154–159.
17. Organizatsiya sistem funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh skhem na osnove modifitsirovannogo koda s summirovaniem vzveshennykh perekhodov [Organization of functional control system of combinational circuits based on modified code with weighted summation of transitions] / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov i dr. // Elektronnoe modelirovanie. 2015. T. 37. № 6. S. 49–68. ISSN 0204–3572.
18. Tenzodatchik H9Z2. Kratkoe opisanie [Load Cell H9Z2. Brief description] / ZEMIC Russia. 2 s.

УДК 05.22.01

Николай Владимирович Купцов, соискатель степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ УГОЛЬНЫХ ТЕРМИНАЛОВ РОССИИ

Nikolay Vladimirovich Kuptsov, PhD candidate in Engineering,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint-Petersburg

Development prospects of Russian marine coal terminals

Аннотация

Статья посвящена логистической тематике в привязке к морским портам. Подробно проанализированы конъюнктура и тенденции мирового грузооборота угля (с использованием оценок и исследований общественных организаций, частного бизнеса, научного сообщества), планы развития угольной промышленности России, перспективные направления сбыта отечественного угля, обеспеченность РФ по сбыту угольных грузов благодаря строительству новых морских терминалов и вводу дополнительных мощностей железнодорожных путей.

Сделан вывод, что стратегия развития морской портовой инфраструктуры требует комплексного аналитического численного подхода, учитывающего потребность в грузообороте на макроэкономическом уровне и скрупулезное планирование ввода производственных активов на внутригосударственном уровне.

Ключевые слова: грузооборот угля, морская логистика, транспортные потоки российского угля, морские порты, угольные перегрузочные комплексы (терминалы).

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-16-23

Summary

The article is focused on logistics with respect to seaports. Detailed analysis of market condition and trends in the global coal freight traffic (based on the estimates and studies performed by public organizations, private sector, scientific community), plans for the development of the coal industry of Russia, promising destinations for the sale of Russian coal, Russian capacity to ship coal cargoes taking into account construction of new marine terminals and launch of additional railroad lines has been performed.

A conclusion is made that the strategy of development of seaport infrastructure requires complex numerical analytical approach that takes into account traffic needs at the macroeconomic level as well as meticulous planning of the launch of new facilities at the government level.

Keywords: coal cargo traffic, marine logistics, Russian coal traffic flows, seaports, coal transshipment facilities (terminals).

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-16-23

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЛОГИСТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ СБЫТА

В XX и XXI вв. наблюдается стремительный рост численности населения на планете (за 1950–2015 гг. — с 2,53 до 7,32 млрд чел. [1]), в связи с этим ежегодно значительно увеличивается спрос (грузооборот) на источники топлива для обеспечения нужд электрогенерации.

Рынок энергоносителей всегда имел тенденцию к росту, переживая краткосрочные кризисы, обусловленные пересмотром стоимости. В нынешнем столетии спрос на энергоносители остается устойчивым, хотя и увеличивается не такими резкими темпами, как в XX в. Международное энергетическое агентство (МЭА) разработало три сценария развития мирового спроса на энергоносители [2], развилка по сценариям условно принята с 2012 г. (рис. 1):

New Policies Scenario (базовый сценарий) — реализация уже озвученных законопроектов, которые повлияют на энергорынки (ограничение выбросов парниковых газов, увеличение эффективности использования энергии и развитие возобновляющихся источников энергии);

Current Policies Scenario — сохранение текущих природоохранных законов без ужесточения, отказ от новых (сценарий предполагает рост спроса на энергоносители к 2040 г. на 10% по сравнению с New Policies Scenario);

450 Scenario — реализация новых законов с целью ограничения глобального потепления на 2 °C, активное развитие технологий альтернативного топлива (сценарий предполагает снижение спроса на энергоносители к 2040 г. на 10% по сравнению с New Policies Scenario).

Даже несмотря на значительное снижение стоимости энергоносителей в кризис 2014–2015 гг., мировой угольный рынок имеет постоянную тенденцию к увеличению спроса, в частности, по прогнозам МЭА [2], потребление угля будет расти на 2,1% ежегодно (до 2019 г.).

До 2040 г., согласно прогнозу МЭА, основным видом топлива останутся нефтепродукты, вторым по важности будет уголь (рис. 2).

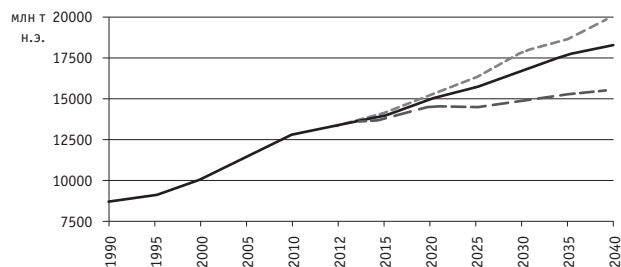


Рис. 1. Общемировой рост спроса на энергоносители (включая уголь, углеводороды, газ, атомную энергию, гидроэнергетику, биотопливо и пр., млн т н. э. — единицы условного топлива по МЭА) [2]:
 ----- Current Policies Scenario;
 — New Policies Scenario; 450 Scenario

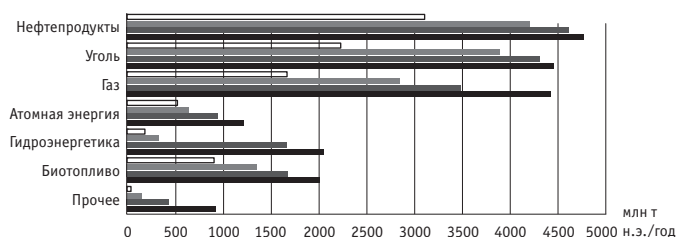


Рис. 2. Мировой спрос на энергоресурсы в 1990–2040 гг. для основного варианта New Policies (млн т н. э. — единицы условного топлива по МЭА) [2]:
 □ — 1990 г.; ■ — 2012 г.; ■ — 2025 г.; ■ — 2040 г.

Уголь традиционно считается наименее дорогим энергоносителем, что подтверждает обзор мирового рынка, выполненный компанией British Petroleum [3]. В единицах условного топлива уголь заметно дешевле основных конкурентов (в 2–3 раза по сравнению с природным газом и в 4–5 раз — по сравнению с нефтью), что определяет высокий спрос на него (динамика наращивания объемов добычи угля представлена в табл. 1).

Таблица 1

Динамика роста мировой добычи угля [3], млн т

Год	1981	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2014
Добыча угля	3913	4476	4774	4642	4722	6094	7473	8165

Россия — крупный игрок на мировом угольном рынке: к концу 2014 г. наша страна занимала вторую позицию по разведанным запасам с долей 18% от мировых. Как свидетельствуют аналитические данные компании British Petroleum, по состоянию на конец 2014 г. мировые доказанные извлекаемые запасы угля (извлечение которых экономически эффективно при использовании современных технических средств и технологий) составили 891,5 млрд т, из них 157 млрд т — в Российской Федерации (рис. 3) [3].

В 2012 г. профессором С. Hafnerndorn выполнен крупный научный анализ мировых грузопотоков энергетического угля между странами и континентами [4]. В основу исследования

положено математическое моделирование добычи и спроса на внутренних рынках в совокупности с глобализацией, экономическими и политическими факторами, мировым рынком. Основные результаты в формате логистической модели приведены на рис. 4 (с 2010 по 2030 г. ожидается увеличение мировых грузопотоков с изменением направлений поставок).



Рис. 3. Мировые запасы угля по состоянию на конец 2014 г. [3]

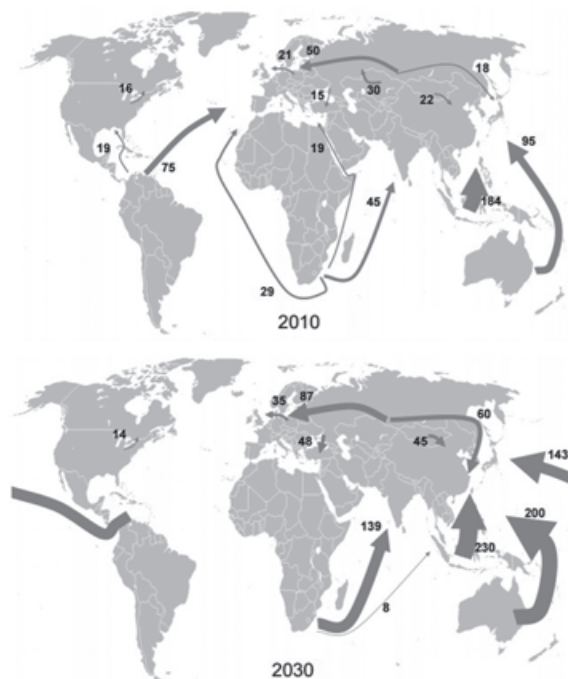


Рис. 4. Мировые морские логистические грузопотоки энергетического угля в 2010 и 2030 гг. (над стрелками указан грузооборот, млн т/год)

Очевидно, что грузооборот угля от основных стран-экспортеров к 2030 г. увеличится на 10% (с 908 до 1009 млн т/год), причем направления морской логистики будут иметь следующие особенности:

двукратный рост грузооборота в Австралии, ЮАР, Колумбии и России;

увеличение экспортных грузопотоков в Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР) со стороны Австралии, Индонезии, Колумбии, России и Казахстана;

удовлетворение европейского спроса за счет угля из Польши и России;

обеспечение Ближнего Востока углем из России;

наращивание Южно-Африканской Республикой грузооборота и концентрация на поставках в Индию.

ПЛАНЫ РАЗВИТИЯ НАПРАВЛЕНИЙ СБЫТА РОССИЙСКОГО УГЛЯ

На территории России находится 22 угольных бассейна и 129 отдельных месторождений. Данные международных [3] и российских исследований о запасах угольных ресурсов разнятся. Так, согласно статистике ТЭК [5], по состоянию на 1 января 2014 г. в РФ сосредоточено 184,9 млрд т разведанных запасов угля (рис. 5), из них свыше 2/3 находятся в восточной части страны за Уральскими горами в двух основных бассейнах — Канско-Ачинском (бурый уголь) и Кузнецком (каменный уголь). Месторождения российского угля не имеют доступа к морю (рис. 6), в связи с этим для транспортировки угля конечному потребителю в страны-импортеры требуется развитие как морских портов, так и железнодорожных подходов к ним, что формирует создание транспортно-логистических цепочек.

В РФ принята долгосрочная программа развития угольной промышленности на период до 2030 г. [6] (табл. 2), в соответствии с которой планируется положительная динамика роста объемов добычи и наращивания экспортных поставок угля, особенно на восточном направлении.

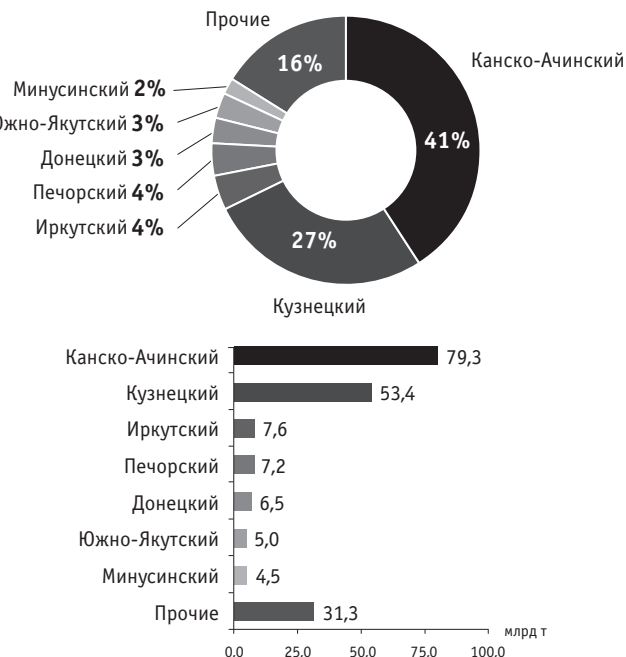


Рис. 5. Запасы угольных бассейнов России по состоянию на 1 января 2014 г.



Рис. 6. Карта угольных ресурсов России (данные Минэнерго РФ)

Таблица 2

Динамика развития угольной промышленности до 2030 г. [6, 7]

№ п/п	Показатель	Объем продукции, млн т						
		Факт			Прогноз			
		2010 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.
1	Добыча угля в РФ	323	352	358	358	380–425	400–450	410–480
2	Поставки угольной продукции, в том числе:	300	315	323	322	338–378	360–405	369–432
2.1	на внутренний рынок	184	175	171	177–172	180–183	195–185	199–192
2.2	на экспорт, в том числе по направлениям:	116	140	153	145–150	158–195	165–220	170–240
2.2.1	атлантическому	82	81	Н. д.	80	74–80	72–80	60–80
2.2.2	восточному	34	59		65–70	84–115	93–140	110–160

Примечание. Показатели 2014 г. приняты по источнику [7], прочие — по [6].

По данным Федеральной таможенной службы, в 2014 г. из 153 млн т наибольшие объемы экспортных поставок российского угля приходились на Китай (25,8 млн т), Великобританию (24,0 млн т), Корею (16,2 млн т), Японию (14,7 млн т) [8]. Очевидно, что самый высокий приоритет имеет восточное направление сбыта, при этом доля экспорта энергетического угля преобладает в сравнении с коксующимся.

УЛУЧШЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РОССИИ ПО СБЫТУ УГОЛЬНЫХ ГРУЗОВ ЗА СЧЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ МОРСКИХ ТЕРМИНАЛОВ

Современный морской порт представляет собой национальный стратегически важный транспортный узел для погрузочно-разгрузочных операций со всеми видами транспорта — морским, речным, железнодорожным, автомобильным, трубопроводным. Развитая портовая инфраструктура — основной драйвер для роста торговли и экономики государства. Помимо этого благодаря портам реализуется национальная морская, таможенная и пограничная политика.

В СССР до 1980-х гг. ощущалась нехватка портовых мощностей. Нередко наблюдалась диспропорция между пропускной способностью портов и массовым объемом грузопотоков — на рейдах портов морские суда зачастую простаивали в ожидании выгрузки или погрузки. К концу 1990-х гг. морские порты России (в составе СССР) с пропускной способностью 360 млн т/год полностью удовлетворяли потребность страны в перевалке международных и внутренних грузов. Развал СССР привел к резкому падению объемов производства и значительному снижению грузопотоков, в том числе портовых [9]. Вместе с этим началась интеграция отечественных портов в мировую транспортную систему. Историю портов современной России с 1991 г. можно разделить на три этапа [9].

1. Преодоление кризисного состояния (1991–2001 гг.). С распадом СССР большая часть портовых мощностей Балтийского (Таллин, Вентспилс, Клайпеда) и Южного (Одесса, Южный, Ильичевск) бассейнов оказалась за пределами РФ. Специализация российских портов не позволяла выполнять экспортную отгрузку в больших объемах, в связи с чем в качестве транзитных использовались порты Украины и Балтии.

За счет увеличения производственной активности портов Севера и Дальнего Востока в указанный период удалось сократить перевалку отечественных грузов в портах сопредельных стран с 50,7 до 26,7 %. К 2001 г. грузооборот портов РФ составил 205,6 млн т/год.

2. Модернизация и ввод новых портовых мощностей (2002–2009 гг.). Благодаря государственно-частным инвестициям введены современные портовые перегрузочные комплексы, в том числе для перевалки угля (Мурманск, Высоцк, Усть-Луга, бухта Мучке в порту Ванино). Проведена модернизация существующих портов — обновление перегрузочной техники, реконструкция и дноуглубление причалов. К 2009 г. доля зарубежных портов для перевалки российских внешнеторговых грузов снизилась до 18 %, грузооборот отечественных портов составил 496,4 млн т/год.

3. Реализация программ «Развитие транспортной системы России» и «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» (с 2010 г. по настоящее время). Создание глубоководных портов-хабов на всех стратегически важных для РФ направлениях для интеграции с международными транспортными потоками и для достижения грузооборота 775 млн т/год к 2016 г.:

на северо-западе (европейское направление) — Мурманск, Усть-Луга;
на юге (европейское и ближневосточное направление) — Тамань, Новороссийск;
на востоке (азиатско-тихоокеанское направление) — Ванино, Восточный.

В истории современной России портовое хозяйство, как и большинство производственных активов, было вовлечено в процесс приватизации. Внутри портов специализированные перегрузочные комплексы (в зарубежной практике их принято называть терминалами) обзавелись хозяевами, в собственности государства остались только причальные сооружения, так как они являются стратегическими объектами. Основная практика управляющих компаний — открытие отдельного юридического лица, осуществляющего услуги по погрузочно-разгрузочным работам в периметре портового терминала. В настоящий момент в РФ перевалку угля выполняют портовые перегрузочные комплексы (терминалы) (табл. 3).

Таблица 3

Существующие в РФ портовые перегрузочные комплексы (терминалы) по перевалке угольных грузов

№ п/п	Терминал (стивидорная компания)	Год запуска	Порт	Механизация	Грузооборот в 2014 г., млн т
Арктический бассейн					
1	ПАО «Мурманский морской торговый порт»	1915	Мурманск	Грейферная	13,9
Балтийский бассейн					
2	ОАО «Ростерминалуголь»	2003	Усть-Луга	Конвейерная	15,5
3	ООО «Универсальный перегрузочный комплекс»	2007		Грейферная	4,0
4	ЗАО «Морской торговый порт Выборг»	1992	Выборг	Грейферная	0,6
5	ООО «Порт Высоцкий»	2004	Высоцк	Грейферная	5,3
6	ОАО «Калининградский морской торговый порт»	1991	Калининград	Грейферная	0,5
Тихоокеанский бассейн					
7	ОАО «Порт Ванино»	1943	Ванино	Грейферная	7,1
8	ЗАО «Дальтрансуголь»	2008		Конвейерная	17,2
9	ОАО «Владивостокский морской торговый порт»	1992	Владивосток	Грейферная	0,6
10	Специализированный угольный комплекс	1978	Восточный	Конвейерная	21,8
11	Универсальный перегрузочный комплекс	1973		Грейферная	
12	ООО «Восточно-Уральский Терминал»	1998		Конвейерная	2,1
13	ООО «Стивидорная компания «Малый порт»	1992		Грейферная	2,6
14	ОАО «ЕВРАЗ Находкинский МТП»	1947	Находка	Грейферная	5,5
15	ОАО «Терминал Астафьева»	2010		Конвейерная + грейферная	1,3
16	ОАО «Торговый порт Посыет»	2004	Посыет	Конвейерная + грейферная	5,1
17	ООО «Угольный морской порт Шахтерск»	2010	Шахтерск	Конвейерная + грейферная	2,0
Черноморский бассейн					
18	ОАО «Туапсинский морской торговый порт»	2004	Туапсе	Грейферная	2,7
19	ПАО «Новороссийский морской торговый порт»	1951	Новороссийск	Грейферная	1,2
20	ООО «Порт Мечел-Темрюк»	1998	Темрюк	Грейферная	1,1
21	ОАО «Таганрогский морской торговый порт»	1943	Таганрог	Грейферная	0,5
22	Прочие терминалы				5,7
Итого					116,3

Примечание. Грузооборот портов 1–21 приведен по информации официальных сайтов терминалов и управляющих компаний, данные граф «Прочие терминалы» и «Итого» — по информации сайта ЗАО «Морцентр-ТЭК» <http://www.morport.com/>.

В российских портах 90 % грузооборота перевалки угля осуществляется в экспортном направлении. Как видно из рис. 7, в РФ существует два основных вектора поставок — в Европейский регион через порты Балтики и Мурманск и в АТР через порты Дальнего Востока. Причем большая часть грузооборота направлена в развивающиеся страны Азии как наиболее перспективные с точки зрения потребности в энергоресурсах. Доля Тихоокеанского бассейна (65,3 %) является подавляющей.

Угольные порты в основном построены во времена СССР, в период новейшей истории России некоторые из них частично модернизировали производство. Новым строительством современных терминалов занимались только ОАО «Кузбассразрезуголь» и ОАО «СУЭК», которым принадлежат технологичные и эффективные комплексы с конвейерной механизацией перевалки угля ОАО «Ростерминалуголь» в порту Усть-Луга (запуск в 2003 г.) и ЗАО «Дальтрансуголь» в порту Ванино (запуск в 2008 г.) соответственно. По результатам приватизации и рыночных сделок большинство перегрузочных комплексов вошли в состав крупных вертикально интегрированных компаний (табл. 4).



Рис. 7. Экспорт угля в 2014 г. по морским бассейнам РФ

Таблица 4

Основные владельцы угольных терминалов в РФ

№ п/п	Компания	Терминалы во владении (управлении)	Доля рынка в 2014 г., %
Отраслевые производственные компании			
1	ОАО «Кузбассразрезуголь»	ОАО «Ростерминалуголь» в порту Усть-Луга Терминалы Восточного порта	32,0
2	ОАО «СУЭК»	ЗАО «Дальтрансуголь» в порту Ванино ПАО «Мурманский морской торговый порт» ООО «Стивидорная компания «Малый порт» в порту Восточном	29,0
3	ОАО «Мечел»	ОАО «Торговый порт Посыет» ООО «Порт Мечел-Темрюк» ОАО «Порт Ванино»	11,4
4	ЕВРАЗ	ОАО «ЕВРАЗ Находкинский МТП»	4,7
5	ООО «Восточная Горнорудная Компания»	ООО «Угольный морской порт Шахтерск»	1,7
Диверсифицированные холдинги			
6	Группа «Сумма»	ПАО «Новороссийский морской торговый порт»	1,0
7	Холдинг «РОСА»	ООО «Порт Высоцкий» ЗАО «Морской торговый порт Выборг»	5,1
Логистическая транспортная компания			
8	UCL Holding	ОАО «Туапсинский морской торговый порт» ОАО «Таганрогский морской торговый порт»	2,8
Итого			100

Лидирующие позиции по обеспеченности портовыми мощностями занимают ОАО «Кузбассразрезуголь» и ОАО «СУЭК», в 2014 г. их доля грузооборота среди российских угольных морских терминалов составила 32,0 и 29,0% соответственно. Инвестиции холдингов в портовые мощности позволяют синхронизировать добычу на собственных шахтах с поставками конечным потребителям, поэтому большинство вертикально интегрированных компаний занимаются проектированием и строительством новых морских перегрузочных комплексов. Прогнозное развитие проектов угольных терминалов до 2030 г. определено Стратегией развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [9] и Долгосрочной программой развития угольной промышленности России на период до 2030 года [6].

Начиная с 2010 г. в профессиональном сообществе наблюдается лавинообразный спрос на разработку проектов строительства новых угольных перегрузочных комплексов (табл. 5) с суммарной пропускной способностью 160 млн т/год (причем семь из девяти проектов локализованы на Дальнем Востоке с грузооборотом 122 млн т/год).

Недостаточная обеспеченность железнодорожными путями и транспортом сдерживает строительство и развитие морских портов. Дальний Восток страны — ключевой регион для экспортных поставок угля. Основным барьером для успешного наращивания грузооборота с крупнейшими действующими бассейнами (Кузнецкий и Канско-Ачинский), а также для планируемых поставок с перспективных месторождений (Кузбасс, Красноярский край, Якутия, прочие регионы Дальнего Востока) является дефицит пропускной способности железных дорог — БАМа и восточной части Транссибирской магистрали. К 2015 г. БАМ и Транссиб функционируют на пределе пропускной способности в связи с ростом грузооборота дальневосточных портов за последние 20 лет. Образование «бутылочных горлышек» (узких мест) приводит в итоге к задержкам

Таблица 5

Основные проекты угольных терминалов в РФ

№ п/п	Проект	Порт	Грузооборот (пропускная способность), млн т/год	Год запуска	Заказчик (инвестор)
1	УППК «Север»	Восточный	20	2017–2019	Группа «Сумма»
2	Сахатранс	Ванино, бухта Мучке	24	2017–2019	Volga Group, «Колмар»
3	Суходол	Владивосток, бухта Суходол	20	2018–2020	ХК «СДС-Уголь», Volga Group
4	Порт «Вера»	Владивосток, мыс Открытый	20	2018–2020	ГК «Ростех»
5	III очередь ППК № 3 ОАО «Восточный порт»	Восточный	+15	2017–2018	ОАО «Кузбассразрезуголь»
6	Портовый терминал ТЭПК	Ванино, мыс Бурный	15	2018–2020	Тувинская Энергетическая Промышленная Корпорация
7	Модернизация порта Шахтерск	Шахтерск (Сахалин)	+8	2018–2022	ООО «Восточная Горнорудная Компания», группа «ИСТ»
8	Лавна	Мурманск	18	2018–2020	Государственная транспортно-лизинговая компания
9	Терминал по перевалке навалочных грузов	Тамань	20	2018–2020	ГК «ОТЭКО»
Итого			160		

Примечание. Пропускная способность приведена по информации официальных сайтов терминалов и управляющих компаний, частично использованы данные отраслевого портала <http://morvesti.ru>.

и неравномерности поставок. В рамках партнерства государства и ОАО «РЖД» реализуется проект развития железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона, в соответствии с которым планируется увеличение пропускной способности БАМа и Транссиба на 66 млн т/год [1] к 2020 г. Очевидно, что из шести планируемых дальневосточных терминалов (см. табл. 5) с суммарным грузооборотом 114 млн т/год будет построено 2–4 с общим грузооборотом до 60 млн т/год. Для реализации большего количества портовых проектов потребуется дополнительная модернизация БАМа и Транссиба или перераспределение грузопотоков российского угля в направлении Балтийского и Черного морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспертные оценки и исследования общественных энергетических организаций (МЭА [2]), частного бизнеса (British Petroleum [3]), научного сообщества [4] свидетельствуют о ежегодном возрастании объемов и грузооборота угля и прочих энергоносителей даже при весомом снижении стоимости в кризис 2014–2015 гг.

Подобного рода прогнозы актуальны для реализации крупных инфраструктурных проектов, в том числе морских портов, вложения в которые являются инвестициями с долгосрочным периодом окупаемости. В настоящее время в России наблюдается рост государственно-частных инвестиций в транспортную инфраструктуру, например в портовые угольные терминалы (уже построены перегрузочные комплексы ОАО «Ростерминалуголь» в порту Усть-Луга и ЗАО «Дальтрансуголь» в порту Ванино), что дает основания говорить о внимании государства к вопросам логистики и транспорта.

В истории современной России грузооборот угля стабильно увеличивается с 1995 г. Наша страна имеет обширную территорию с выгодным географическим положением, которое позволяет осуществлять морские грузопотоки в зависимости от изменения геополитической обстановки и мировых рынков сбыта. После периодов, связанных со становлением самостоятельности российских портов (1991–2001 гг.) и модернизацией существующей базы (2002–2009 гг.), в РФ до 2030 г. ожидается качественное развитие морской экспортной портовой инфраструктуры по всем трем географическим направлениям [9] — это Западная Европа, Ближний Восток, АТР.

В секторе экспортной перевалки российских энергетических углей особенно ощущается нехватка портовых мощностей. Планируется увеличение грузооборота угля с фактического 116,3 млн т в 2014 г. (см. табл. 3) до прогнозируемого 166,0 млн т/год к 2030 г. [9]. Удвоение грузооборота возможно лишь благодаря строительству новых терминалов, проектирование которых осуществлялось в 2012–2015 гг. При сред-

нем грузообороте российских экспортных угольных терминалов 10–12 млн т/год (для I этапа строительства) потребуется ввод 4–6 новых, самые перспективные из них:

в юго-западном направлении — проект «Тамань» (терминал по перевалке навалочных грузов);

в северо-западном — проект «Мурманск» (терминал Лавна);

в дальневосточном — семь проектов: Ванино (терминалы Сахатранс и ТЭПК), порт Восточный (УППК «Север», III очередь ППК № 3 ОАО «Восточный порт»), Владивосток (терминалы Суходол и «Вера»), модернизация порта Шахтерск.

Сдерживающим фактором является дефицит пропускной способности железнодорожных подходов. В связи с этим реализуется проект модернизации БАМа и Транссиба для увеличения их пропускной способности на 66 млн т/год [1] к 2020 г., что позволит построить только часть из запланированных дальневосточных портовых терминалов.

Драйвером увеличения грузооборота угля и морских судозаходов в перспективе может стать более интенсивное использование Северного морского пути — кратчайшего транспортного маршрута между портами Северной Европы и Азии (в российских реалиях — между Мурманском и Владивостоком), чему способствуют следующие обстоятельства [1]:

экономическая эффективность (расстояние и длительность плавания короче в сравнении с маршрутом Роттердам — Суэцкий канал — Азия, следовательно, меньше затраты на фрахт судна и топливо);

безопасность для грузов и экипажа (при использовании маршрута через Суэцкий канал существует вероятность захвата судна вооруженными пиратами в районе Аденского залива, Индийского океана, Аравийского моря и Южно-Китайского моря); ежегодное увеличение периода навигации в сентябре-ноябре в связи с глобальным потеплением (в последние 30 лет наблюдается уменьшение ледового поля).

В эпоху высоких рисков с точки зрения рыночной стоимости энергоресурсов и неопределенностей реализации новых проектов восполнения ресурсной базы особо актуальными будут задачи по повышению эффективности и оптимизации объектов. Пройдена веха, благодаря которой определены основные направления развития угольных портов. Портовые перегрузочные комплексы (терминалы) в связи с интеграцией большого количества транспортных и перегрузочных операций помимо стратегического подхода требуют применения современных методик детализированного проектирования — как статических математических расчетов, так и динамического симуляционного моделирования. Освоение, разработка и апробация комплексных современных методик проектирования логистических объектов является важнейшей задачей для российской науки.

Литература

1. World Population Prospects: The 2012 Revision / United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, June 2013.
2. World Energy Outlook 2014 // IEA publications. 2014. November. 728 p.
3. British Petroleum Statistical Review of World Energy. 2015. June.
4. Haftendorn C. Economics of the Global Steam Coal Market — Modeling Trade, Competition and Climate Policies : genehmigte dissertation. Berlin, 2012. 154 p.
5. ТЭК России — 2014 / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. 2015. Июнь [Электронный ресурс]. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/5451.pdf> (дата обращения: 14.12.2015).
6. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 14-р от 24.01.12 [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/media/files/41d4eab427ce44a21148.pdf> (дата обращения: 14.12.2015).
7. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2014 года // Уголь. 2015. № 3 (1068). С. 56–71. ISSN 0041–5790.
8. Федеральная таможенная служба РФ. Экспорт-импорт важнейших товаров [Электронный ресурс]. URL: http://www.customs.ru/index.php?option=com_newsfts&view=category&id=52&Itemid=1978 (дата обращения: 14.12.2015).
9. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года / одобрена на совещании членов Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации 28.09.12 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosmorport.ru/media/File/strategy.pdf> (дата обращения: 14.12.2015).
10. Перспективы развития. Транспортные коридоры Восточного полигона (БАМ и Транссиб) [Электронный ресурс]. URL: http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5128&layer_id=3290&id=2221 (дата обращения: 14.12.2015).
11. Kuptsov N. Northern Sea Route: Perspectives for Bulk Carriers and Liquid Tankers // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 587–589. P. 1986–1992.

References

1. World Population Prospects: The 2012 Revision / United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, June 2013.
2. World Energy Outlook 2014 // IEA publications. 2014. November. 728 p.
3. British Petroleum Statistical Review of World Energy. 2015. June.
4. Haftendorn C. Economics of the Global Steam Coal Market — Modeling Trade, Competition and Climate Policies : genehmigte dissertation. Berlin, 2012. 154 p.
5. TEK Rossii — 2014 / Analiticheskiy tsentr pri Pravitelstve Rossiyskoy Federatsii. 2015. Iyun [Fuel and Energy Complex of Russia — 2014 / Analytical Centre under the Government of the Russian Federation. June 2015]. [Electronic resource]. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/5451.pdf> (date accessed: 14.12.2015).
6. Dolgosrochnaya programma razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda [Long-term development program of the Russian coal industry for the period up to 2030] / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 14-r ot 24.01.12 [Electronic resource]. URL: <http://government.ru/media/files/41d4eab427ce44a21148.pdf> (date accessed: 14.12.2015).
7. Tarazanov I. G. Itogi raboty ugolnoy promyshlennosti Rossii za yanvar-dekabr 2014 goda [Performance results of the coal industry of Russia for January-December 2014] // Ugol. 2015. № 3 (1068). S. 56–71. ISSN 0041–5790.
8. Federalnaya tamozhennaya sluzhba RF. Eksport-import vazhneyshikh tovarov [Federal Customs Service. Export-import of essential goods]. [Electronic resource]. URL: http://www.customs.ru/index.php?option=com_newsfts&view=category&id=52&Itemid=1978 (date accessed: 14.12.2015).
9. Strategiya razvitiya morskoy portovoy infrastruktury Rossii do 2030 goda [Strategy for the development of marine port infrastructure in Russia up to 2030] / odobrena na soveshchani chlenov Morskoy kollegii pri Pravitelstve Rossiyskoy Federatsii 28.09.12 [Electronic resource]. URL: <http://www.rosmorport.ru/media/File/strategy.pdf> (date accessed: 14.12.2015).
10. Perspektivy razvitiya. Transportnye koridory Vostochnogo poligona (BAM i Transsib) [Development prospects. Transport corridors of the Eastern area (BAM and Transsib)]. [Electronic resource]. URL: http://cargo.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5128&layer_id=3290&id=2221 (date accessed: 14.12.2015).
11. Kuptsov N. Northern Sea Route: Perspectives for Bulk Carriers and Liquid Tankers // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 587–589. P. 1986–1992.

УДК 624.012.454

Сергей Александрович Бокарев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск,
Дмитрий Николаевич Смердов, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Sergey Alexandrovich Bokarev, DSc in Engineering, Professor, Head of Department of Bridges, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk,
Dmitriy Nikolayevich Smerdov, PhD in Engineering, Head of Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Polymer composite materials in transport construction industry

Аннотация

Приведены сведения о прочностных и деформативных характеристиках композиционных материалов, их достоинствах и недостатках, а также данные о применении полимерных композиционных материалов в качестве элементов усиления несущих конструкций мостов, основных несущих конструкций и эксплуатационного обустройства транспортных сооружений. Показана необходимость поиска новых эффективных конструктивных решений по использованию полимерных композиционных материалов в практике транспортного строительства.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, транспортное строительство, углеродное волокно, углепластик, стеклопластик, конструктивные решения.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-24-30

Summary

Information on the strength and deformation characteristics of composite materials, their advantages and disadvantages, as well as the data on the use of polymer composite materials as reinforcement components of bearing structures of bridges, major load carrying structures and transport facilities infrastructure has been provided. The need for the search for new effective design solutions involving the use of polymer composites in transportation construction industry practice is shown.

Keywords: polymer composite materials, transport construction, carbon fiber, carbon composite, fiberglass, structural solutions.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-24-30

Полимерными и композиционными материалами называют пластики, армированные высокопрочными волокнами. Пластики получают в результате отверждения полимерных компаундов, которые выполняют функцию матрицы, объединяя армирующие волокна [1–11]. Все волокна композиционных материалов имеют высокое сопротивление осевому растяжению — более 2000 МПа, а модуль упругости варьируется в пределах от 62 до 760 ГПа [2–6]. Для сравнения: у сталей различных марок нормативное сопротивление при осевом растяжении может составлять 400 МПа, а модуль упругости — 205 ГПа. Углеродные и арамидные волокна хорошо сопротивляются многим агрессивным воздействиям — щелочам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нитратам и др. При воздействии огня стекловолокна сохраняют прочность до точки плавления более 1000 °С. Углеродные волокна окисляются на воздухе при температуре около 650 °С. Арамидные волокна не могут использоваться при температуре выше 200 °С. Все типы волокон не поддерживают горение. Полимерные матрицы на основе эпоксидной смолы имеют температуру стеклования 60–80 °С [3]. Изделия из композиционных материалов на основе углеродных волокон называют углепластиками, а на основе стеклянных — стеклопластиками [1]. В большинстве случаев композиционные материалы рассматривают в качестве альтернативы стали различных марок [5]. Это связано с тем, что полимерные композиционные материалы по сравнению со сталью обладают более высокими прочностными и деформативными характеристиками, не подвержены коррозии, старению и усталости, имеют малый собственный вес, способны к активной регулировке прочностных и деформативных характеристик за счет применения различных видов армирующих волокон.

В связи с тем что из композиционных структур можно получить материалы в широком диапазоне физических, прочностных и деформативных характеристик, они нашли применение во многих отраслях промышленности — авиационной, космической, атомной, газовой, строительной и др. [1–9]. Так, в авиации доля только композиционных полимерных матери-

алов на основе стекло- и углеродных волокон, используемых в фюзеляже и планере современных самолетов, составляет 29–35 %. Причем применение композиционных материалов в конструкциях отечественных и зарубежных самолетов непрерывно возрастает [1]. В космической отрасли многие элементы конструкций летательных аппаратов и разгонных блоков также изготавливают из композиционных материалов. К таким элементам относятся высокопрочные штанги, стержни, ферменные и «сухие» отсеки, обтекатели ракет-носителей, панели солнечных батарей, сосуды давления, трубопроводы и др. [1]. Полимерные композиционные материалы широко используются также в промышленном, гражданском и транспортном строительстве — при возведении новых, реконструкции или капитальном ремонте эксплуатируемых сооружений различного назначения [7, 9, 10].

Область применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве в целом можно разделить на три основных направления. К первому относится использование композиционных материалов в качестве составных элементов несущих конструкций мостов, например: внешнее армирование при усилении железобетонных или металлических конструкций пролетных строений и опор [2–6], армирование бетона [7, 8] и пр. Ко второму — применение в качестве материала, из которого изготавливают основные несущие конструкции мостов: цельно-композитные конструкции пролетных строений, несущие элементы ферм или главных балок [9] и пр. К третьему — использование полимерных композиционных материалов для изготовления эксплуатационных устройств: водоотводных лотков, перильных ограждений тротуаров, основания дорожных знаков и пр.

В полимерных композиционных материалах, которые применяются в качестве усиления несущих конструкций мостов для восприятия значительных по величине изгибающих моментов или продольных сил, чаще используют углеродные волокна. По сравнению со стекловолокном они имеют более высокий модуль упругости (не ниже мостовой стали) и обеспечивают повышение несущей способности и жесткости конструкции. На сегодняшний день накоплен значительный отечественный и зарубежный опыт применения композиционных материалов при усилении изгибаемых железобетонных элементов: проведено большое количество экспериментальных исследований [2–5], разработаны методики оценки несущей способности и выносливости железобетонных пролетных строений, усиленных композиционными материалами, и для железнодорожных, и для автодорожных мостов [5]. В меньшей степени изучено использование композиционных материалов при усилении сжатых железобетонных элементов мостов — свайных и стоечных опор, опор-стенки и т. д. В качестве примера можно привести экспериментальные исследования несущей способности сжимаемых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами, подтвердившие эффективность применения последних [6].

С 2008 г. в НИЛ «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС) начаты широкомасштабные экспериментальные исследования по оценке несущей способности, долговечности и выносливости изгибаемых железобе-

тонных элементов мостов, усиленных полимерными композиционными материалами [2, 4]. На рис. 1 показан пример испытания в НИЛ «Мосты» СГУПС изгибаемого железобетонного образца, усиленного холстами на основе углеродных волокон.

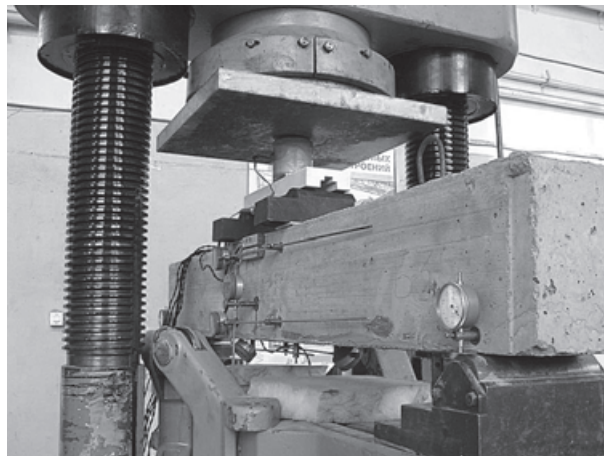


Рис. 1. Общий вид экспериментального железобетонного образца, усиленного холстами на основе углеродных волокон

Проведенный комплекс экспериментов с железобетонными образцами, усиленными полимерными композиционными материалами, позволил разработать эффективные конструктивные решения по усилению автодорожных мостов. В частности, на рис. 2 представлен фрагмент усиления моста через реку Тарсьму в Новосибирской области (проект, реализованный в 2013 г. специалистами НИЛ «Мосты» СГУПС).



Рис. 2. Конструкция усиления железобетонного пролетного строения композиционными материалами

В 2015 г. впервые в России был утвержден свод правил СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами» [12]. Этот нормативный документ разработан специалистами НИЦ «Строительство — НИИЖБ им. А. А. Гвоздева», ЗАО «Триада-Холдинг» и ЗАО «ХК «Композит» и содержит требования к расчету и проектированию усиления или восстановления композитными материалами

бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения, на которые распространяются требования СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» [13]. То есть утвержденный в 2015 г. СП 164.1325800.2014 может применяться только в практике промышленного и гражданского строительства. Также необходимо отметить, что СП 164.1325800.2014 разработан по аналогии с правилами, регламентирующими требования к проектированию новых конструкций, однако усилению подвергаются главным образом эксплуатируемые конструкции, особенности работы которых необходимо учитывать при расчете и проектировании усиления.

Опыт использования полимерной композиционной арматуры в качестве рабочей в железобетонных пролетных строениях мостов вместо стержневой металлической арматуры отсутствует. Это связано с тем, что до сих пор не разработаны необходимые нормативно-технические документы по расчету и проектированию таких конструкций.

В Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) проведены экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых бетонных элементов, армированных продольной стержневой композиционной арматурой [7, 8], конструкция испытанных образцов представлена на рис. 3.

Результаты исследований показали, что несущая способность бетонных образцов с композиционной арматурой на основе углеродных волокон FibARM Rebar \varnothing 10 мм значительно выше (в среднем на 151–185 %) по сравнению с бетонными образцами, армированными композиционными материалами \varnothing 10 мм на основе стеклянных волокон, и на 260 % выше, чем у образцов с металлической арматурой класса А400 \varnothing 10 мм. Согласно испытаниям, применение ненапряженной стержневой углепластиковой арматуры в качестве рабочей в бетонных конструкциях мостов возможно, а стеклопластиковой — нет из-за низкого модуля упругости. Стеклопластиковая арматура может использоваться в мостостроении только в качестве конструктивной, например противоусадочной в главных балках железобетонных пролетных строений, для изготовления сеток при устройстве защитного покрытия гидроизоляции мостового полотна или арматурного каркаса бетонных ограждений безопасности проезда.

К отечественному опыту применения композиционных материалов, из которых изготавливали основные несущие элементы мостов, можно отнести построенные в Москве с 2004 г. по заказу ОАО «РЖД» пешеходные мосты с цельнокомпозитными пролетными строениями. На рис. 4 представлен общий вид такого моста с ферменными пролетными строениями из стеклопластиковых элементов определенного профиля [9].

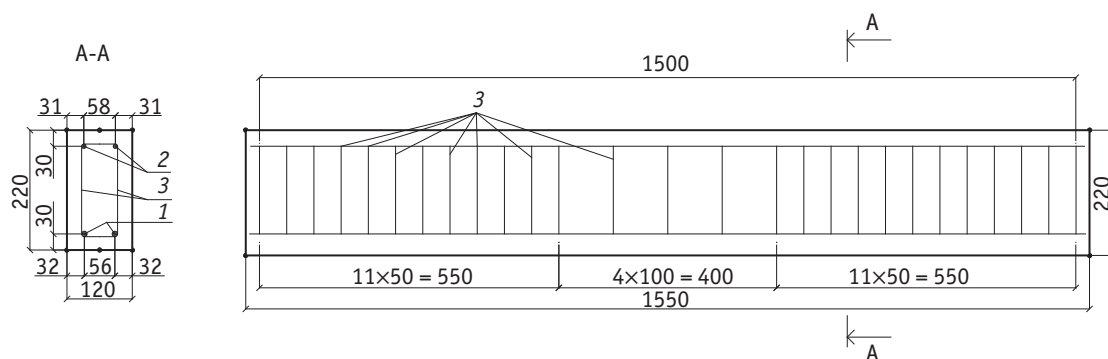


Рис. 3. Конструкция бетонных балок, армированных композиционными полимерными материалами:
1 — полимерная композиционная арматура \varnothing 10 мм; 2 — полимерная композиционная арматура \varnothing 8 мм;
3 — поперечная металлическая арматура (хомуты) класса А240 \varnothing 6,5 мм



Рис. 4. Пешеходный мост с цельнокомпозитным пролетным строением:
общий вид моста (а) и проходной части (б)

В компании ОАО «РЖД» существует идея по созданию опытной конструкции цельнокомпозитного балочного пролетного строения, изготовленного из пултрузионного стеклопластика, для железнодорожных мостов, запроектированных под нагрузку С14. Трудность в реализации этой идеи заключается в том, что стеклопластики имеют относительно невысокий по сравнению с мостовой сталью марки 10ХСНД модуль упругости. У несущих конструкций, которые изготавливают из композиционных материалов на основе стеклянных волокон или в которых они применяются как армирующий элемент, возникает проблема обеспечения требуемой жесткости конструкций [9], а следовательно, необходимость в создании определенных конструктивных форм главных балок пролетных строений.

Предварительные расчеты, выполненные методом конечных элементов в программно-вычислительном комплексе MIDAS/Civil, подтверждают, что такое решение может быть найдено. Так, на рис. 5 представлена пространственная расчетная конечно-элементная модель цельнокомпозитного балочного пролетного строения из пултрузионного стеклопластика расчетным пролетом 32 м, которая была загружена расчетной временной вертикальной нагрузкой от подвижного состава на железных дорогах С14.

Пролетное строение выполнено из монолитного изотропного стеклопластика, который имеет следующие свойства: плотность — 1900 кг/м³, модуль упругости — 70 ГПа. По результатам расчета определены вертикальные прогибы пролетного строения при загрузке временной нагрузкой С14 (рис. 6).

Максимальный прогиб в середине пролета составил 38,72 мм, что меньше предельно допустимого значения $v = 42,11$ мм, предусмотренного п. 5.43 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [14] и определяемого по формуле

$$v = \frac{1}{800 - 1,25l} l \leq \frac{1}{600} l, \quad (1)$$

где l — расчетный пролет пролетного строения, м.

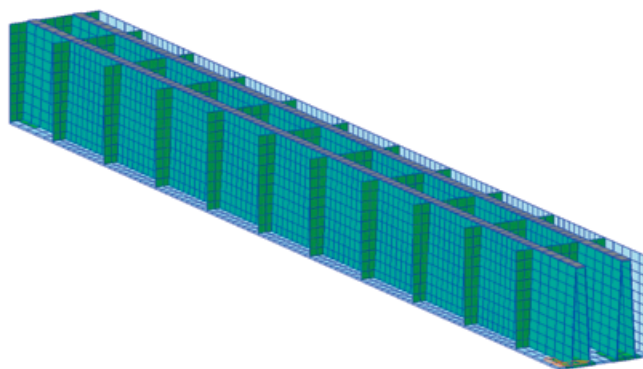


Рис. 5. Конечно-элементная модель цельнокомпозитного пролетного строения из пултрузионного стеклопластика с расчетным пролетом 32 м

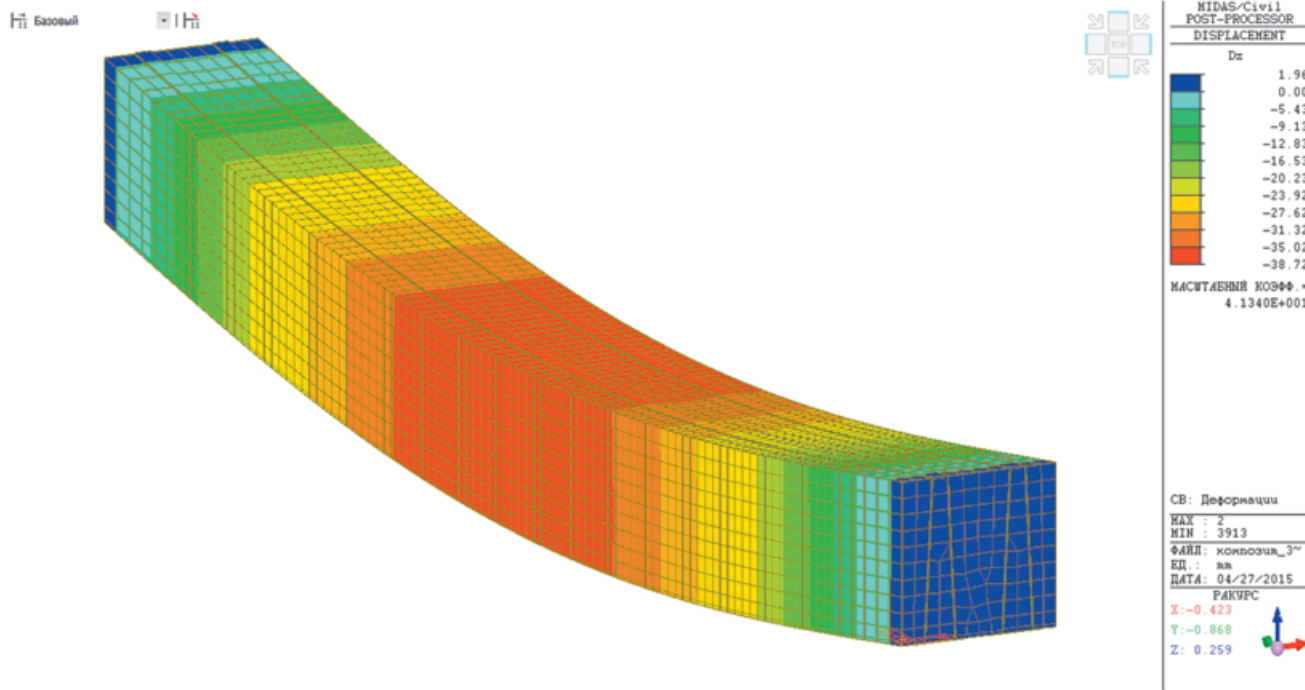


Рис. 6. Значение вертикальных перемещений цельнокомпозитного пролетного строения из пултрузионного стеклопластика при загрузке временной нагрузкой С14

Если в отечественной практике строительства железнодорожных мостов отсутствует опыт реализации проекта с пролетными строениями из композиционных материалов, то в строительстве автодорожных мостов такой опыт существует. Так, в 2014 г. в Новосибирской области на автомобильной дороге 5-й технической категории был открыт первый однопролетный автодорожный мост с гибридным по материалу пролетным строением, несущие элементы которого — железобетонная плита и многораскосные фермы из стеклопластиковых элементов под автодорожную нагрузку А14 и Н14 полной длиной 18 м (рис. 7) [11, 15].

Особенность этой конструкции пролетного строения состоит в том, что в качестве несущих элементов использованы многораскосные фермы из стеклопластика, включенные в совместную работу с монолитной железобетонной плитой при помощи гибких упоров для повышения ее жесткости.

В настоящее время в российской практике транспортного строительства композиционные материалы широко применяют для изготовления эксплуатационных обустройств мостовых сооружений, расположенных на автомобильных дорогах общего пользования. При новом строительстве и выполнении ремонтов существующих мостов устраивают стеклопластиковые перильные ограждения, телескопические водоотводные лотки и пр. (рис. 8).

Изучение опыта использования полимерных композиционных материалов в различных отраслях Российской Федерации и за рубежом показало, что для более широкого внедрения композиционных материалов в транспортном строительстве как на железных, так и на автомобильных дорогах следует искать новые эффективные конструктивные решения. На их основе необходимо разрабатывать прогрессивные технологические процессы по ремонту, капитальному ремонту, реконструкции



Рис. 7. Общий вид гибридного по материалу автодорожного моста во время загрузки испытательной нагрузкой

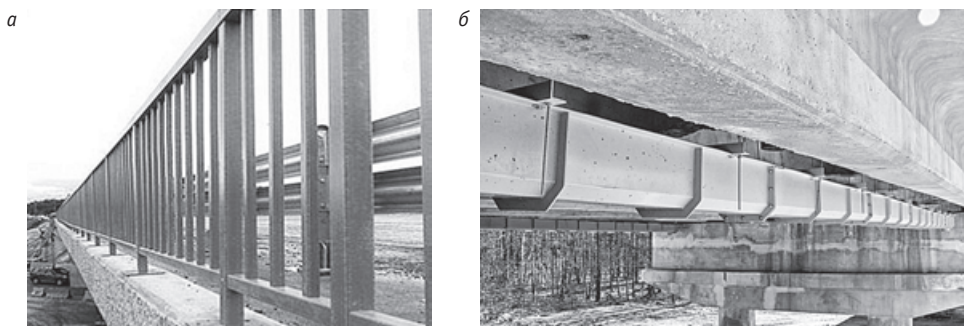


Рис. 8. Эксплуатационные обустройства мостов из полимерных композиционных материалов: а — перильные ограждения; б — водоотводные лотки

и новому строительству искусственных сооружений, применение которых, в свою очередь, будет способствовать повышению несущей способности, улучшению эксплуатационной надежности, долговечности и безопасности объектов транспортной инфраструктуры. Для этого требуется создавать новые и корректировать существующие алгоритмы и методики использования полимерных композиционных материалов, в частности совершенствовать методы расчета, изучения свойств и особенностей эксплуатации композиционных материалов с учетом их совместной работы в несущих элементах объектов транспортной инфраструктуры при воздействии нагрузок.

Эти цели и задачи хорошо согласуются с градостроительным законодательством Российской Федерации, в соответствии с которым здания и сооружения должны эксплуатироваться

на основании требований технических регламентов. Согласно ст. 7 закона от 23.12.09 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [16], строительные конструкции должны обладать такой прочностью и устойчивостью, чтобы в процессе строительства и эксплуатации не возникало угрозы причинения вреда жизни или здоровью людей. Прочность и устойчивость зданий и сооружений для обеспечения их механической безопасности должна подтверждаться расчетами. При этом для элементов строительных конструкций, характеристики которых могут изменяться в процессе эксплуатации под воздействием климатических факторов или агрессивных факторов наружной и внутренней среды, в проектах должны быть дополнительно указаны параметры, характеризующие сопротивление таким воздействиям.

Литература

1. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
2. Бокарев С. А., Смердов Д. Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. № 2. С. 112–124. ISSN 0536–1052.
3. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами / С. А. Бокарев, А. Н. Костенко, Д. Н. Смердов и др. // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 3. С. 1–9 [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (дата обращения: 16.12.2015).
4. Бокарев С. А., Смердов Д. Н. Исследование многократного замораживания и оттаивания на изменение несущей способности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 98–104. ISSN 1815–9400.
5. Неровных А. А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 201 с.
6. Смердов Д. Н., Кобелев К. В., Лягуша Т. К. Изучение сжатых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами // Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2014. Вып. 11. С. 55–60.
7. Клементьев А. О., Смердов М. Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений, армированных композитной арматурой // Вестник УрГУПС. 2013. № 4 (20). С. 74–80. ISSN 2079–0392.
8. Клементьев А. О., Смердов Д. Н., Смердов М. Н. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 50–56. ISSN 1815–9400.
9. Мостовые конструкции из композитов / А. Е. Ушаков, Ю. Г. Клементьев, Т. Г. Сорокина и др. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.apatech.ru/comnan.html> (дата обращения: 16.12.2015).

References

1. Komkov M. A., Tarasov V. A. Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktсий raket i sredstv porazheniya : ucheb. posobie [A technique for winding of composite structures of missiles and weapon systems : a textbook]. M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2011. 431 s.
2. Bokarev S. A., Smerdov D. N. Eksperimentalnye issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami [Experimental studies of bent concrete elements reinforced by composites] // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2010. № 2. S. 112–124. ISSN 0536-1052.
3. Eksperimentalnye issledovaniya pri ponizhenykh i povyshennykh temperaturakh zhelezobetonnykh obraztsov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Experimental studies at low and elevated temperatures of concrete specimens reinforced by polymer composites] / S. A. Bokarev, A. N. Kostenko, D. N. Smerdov i dr. // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2013. № 3. S. 1–9 [Electronic resource]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (date accessed: 16.12.2015).
4. Bokarev S. A., Smerdov D. N. Issledovanie mnogokratnogo zamorazhivaniya i ottaivaniya na izmenenie nesushchey sposobnosti i deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitsionnymi materialami [Research of multiple freezing and thawing influence on change of bearing and deformative abilities of the reinforced concrete flexural elements strengthened by the composite materials] // Transport of the Urals. 2010. № 3 (26). S. 98–104. ISSN 1815-9400.
5. Neronnykh A. A. Sovershenstvovanie metodiki otsenki gruzopodъемnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov, usilennykh kompozitsionnymi materialami : dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of methodology for assessing carrying capacity of concrete superstructures of railway bridges reinforced by composite materials : PhD in Engineering Thesis]. Novosibirsk, 2013. 201 s.
6. Smerdov D. N., Kobelev K. V., Lyagusha T. K. Izuchenie szhatykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitsionnymi materialami [Study of compressed concrete elements reinforced by composite materials] // Nauchnye trudy obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala. Novosibirsk : Izd-vo SGUPS, 2014. Vyp. 11. S. 55–60.
7. Klementev A. O., Smerdov M. N. Otsenka nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh prolyotnykh stroeniy, armirovannykh kompozitnoy armaturoy [Evaluation of load carrying capacity of composite fiber reinforced concrete spans] // Herald of USURT. 2013. № 4 (20). S. 74–80. ISSN 2079-0392.
8. Klementyev A. O., Smerdov D. N., Smerdov M. N. Eksperimentalnye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, armirovannykh v szhatoy i rastyanutoy zone nemetallicheskoй kompozitsionnoy armaturoy [Experimental studies of the strength and deformability of bending concrete members with nonmetallic composite reinforcement in compression and tension zone] // Transport of the Urals. 2014. № 4 (43). S. 50–56. ISSN 1815-9400.

10. Шилин А. А., Пшеничный В. А., Картузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. М. : Стройиздат, 2007. 184 с.
11. Иванов А. Н. Испытание автодорожного моста с пролетным строением из полимерного композиционного материала // Стеклопластик в пролетном строении автодорожного моста : сб. статей. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. С. 44–53.
12. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lidermsk.ru/site-media/uploads/materials/docs/50/502cb835e73d0152df32380c52c89efe.pdf> (дата обращения: 11.01.2016).
13. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095246> (дата обращения: 11.01.2016).
14. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы [Электронный ресурс]. URL: http://helpeng.ru/library/norm_doc/sp_new/sp_35.13330.2011.pdf (дата обращения: 11.01.2016).
15. Иванов А. Н., Яшнов А. Н. Экспериментальные исследования пролетного строения из полимерного композиционного материала // Вестник ТОГУ. 2014. № 4 (35). С. 61–69. ISSN 1996–3440.
16. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федер. закон от 23.12.09 № 384-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/57/57096/index.htm> (дата обращения: 11.01.2016).
9. Mostovye konstruksii iz kompozitov [Bridge structures made of composites] / A. E. Ushakov, Yu. G. Klenin, T. G. Sorina i dr. [Electronic resource]. URL: <http://www.apatech.ru/comnan.html> (date accessed: 16.12.2015).
10. Shilin A. A., Pshenichnyi V. A., Kartuzov D. V. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami [External reinforcement of concrete structures using composite materials]. M. : Stroyizdat, 2007. 184 s.
11. Ivanov A. N. Ispytanie avtodorozhnogo mosta s prolyotnym stroeniem iz polimernogo kompozitsionnogo materiala [Testing road bridge with spans made of polymeric composite material] // Stekloplastik v prolyotnom stroenii avtodorozhnogo mosta : sb. statey. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. S. 44–53.
12. SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures with composite materials]. [Electronic resource]. URL: <http://www.lidermsk.ru/site-media/uploads/materials/docs/50/502cb835e73d0152df32380c52c89efe.pdf> (date accessed: 11.01.2016).
13. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095246> (date accessed: 11.01.2016).
14. SP 35.13330.2011. Mosty i truby [Bridges and pipes]. [Electronic resource]. URL: http://helpeng.ru/library/norm_doc/sp_new/sp_35.13330.2011.pdf (date accessed: 11.01.2016).
15. Ivanov A. N., Yashnov A. N. Eksperimentalnye issledovaniya prolyotnogo stroenia iz polimernogo kompozitsionnogo materiala [Experimental studies of span structures made of polymeric composite materials] // Vestnik TOGU. 2014. № 4 (35). S. 61–69. ISSN 1996-3440.
16. Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy : Feder. zakon ot 23.12.09 № 384-FZ [Technical regulation on safety of buildings and structures : Federal Law of 23.12.09 No. 384-FZ]. [Electronic resource]. URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/57/57096/index.htm> (date accessed: 11.01.2016).

УДК 331.108

Петр Николаевич Рубежанский, кандидат экономических наук, советник компании «Русские технологии», Москва

ПОВЕДЕНЧЕСКИЙ МЕТОД В ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВА

Petr Nikolayevich Rubezhanskiy, PhD in Economics, Economic Problems Advisor,
JSC Russian Technology, Moscow

Behavioral method in performance management

Аннотация

В статье изложен поведенческий метод, позволяющий получить наиболее точные данные о деятельности специалистов и руководителей производственных подразделений любого уровня и на этой основе построить эффективную систему стимулирования. Рассмотрен механизм определения нормативной трудоемкости. Предложена методика подготовки и переподготовки работников, а также найма рабочей силы для реализации современных бизнес-процессов компании «РЖД».

Ключевые слова: единица измерения информации, затраты труда работника, количество труда, качественная оценка труда, коэффициент значимости, механизм определения нормативной трудоемкости.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-31-34

Summary

The article describes a behavioral method allowing to obtain the most accurate information on the activities of employees and managers of various company departments at any level, and to build an effective system of incentives on this basis. A mechanism for determining standard labor intensity is considered. A technique for training and retraining of workers and hiring new employees for implementation of modern business processes of JSC Russian Railways has been proposed.

Keywords: unit of information, employee labor costs, amount of labor, qualitative assessment of labor, significance coefficient, mechanism for determining standard labor intensity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-31-34

В настоящее время существует не очень много компаний, особенно на транспорте в России, где руководители серьезно рассматривают проблему того, как правильно и достойно оценивать работников инженерного и умственного труда, косвенно обеспечивающих в конечном счете прибыльную деятельность предприятия в целом и его структурных подразделений. У административно-управленческих работников (АУР) компании ОАО «РЖД», как и у всех подобного рода специалистов, нет однозначного материального предмета труда, хотя каждому из них приходится работать и с технологическими процессами, и с плановыми документами, а также со всеми профессионально-квалификационными группами предприятий, станций и целого ряда структурных подразделений филиалов холдинга «РЖД» [1, 2].

Мы уже привыкли к тому, что под информацией понимают любые сведения устного, письменного или визуального характера. И здесь возникает вторая проблема — как подсчитать и учесть объем перерабатываемой информации или, иначе говоря, что взять за единицу ее измерения, если понимать под ней любую деятельность, при которой работник вступает в контакт с работодателями и должностными руководителями, имеет дело с документами, механизированными, автоматизированными и прочими способами организации выпуска конечного производственного продукта.

Для того чтобы установить длительность получения, переработки и предоставления информации, полезность ее, необходимо определять затраты труда работника, взяв в качестве расчетной какую-то величину (единицу).

Наша точка зрения состоит в том, что наиболее полно этому требованию отвечает так называемый поведенческий метод, позволяющий получить точные данные о деятельности специалистов и руководителей производственных подразделений любого уровня и создать эффективную систему стимулирования [3].

В рыночной экономике систему стимулирования следует строить на основе роста производительности труда как отдельно взятого работника, так и подразделения в целом, что соответствует главным постулатам теории управления и теиловскому подходу к организации нормирования трудозатрат в производственном процессе.

Любой трудовой процесс (физический, умственный) основывается на умении воплощать в конкретные дела знания и опыт каждого (рис. 1). Для увязки стимулирования работников рассматриваемой категории с конечными результатами их деятельности необходимо следующее.

1. Определить количественную и качественную оценку труда работника пропорционально эффективно затраченному (отработанному) времени или проценту выполнения планового задания.

2. На основе этих оценок рассчитать коэффициент количества труда (ККТ), характеризующий выполнение объема работы конкретного работника.

3. Определить умение работника воплощать его знания и опыт в конкретные дела на основе коэффициента значимости ($K_{зн}$).

Тогда заработная плата i -го работника будет рассчитываться как

$$ЗП_i = Д \cdot ККТ \cdot K_{зн} \cdot K_{нр} \quad (1)$$

где $Д$ — должностной оклад за отработанное время, руб.;

$K_{н}$ — коэффициент нормативной трудоемкости.

Предлагаемая система стимулирования (регулирования) оплаты труда отражает зависимость между личным вкладом работника и конечными результатами труда коллектива, например какого-то отдельно взятого отдела, службы, департамента и т. д. Чем меньше отдача от работника, тем рейтинг подразделения будет ниже, и наоборот [4, 5].

Представляется, что аналогичный механизм с некоторыми изменениями можно использовать и для нормирования труда работников подразделений любого уровня иерархии, например связанных с созданием инновационных разработок. Каковы же здесь особенности?

Во-первых, различный по продолжительности период в зависимости от длительности поиска и внедрения технико-экономических и технологическо-организационных новшеств.

Во-вторых, особая система материального стимулирования, которая способна увязать размер вознаграждения с уровнем норм затрат труда (нормативной трудоемкости) работника и обоснованностью трудоемкости выполненной в отчетном периоде работ (операций) или деловых процедур. С этой целью определяется нормативная трудоемкость выполняемых подразделением работ с учетом незавершенных на начало и конец анализируемого периода.

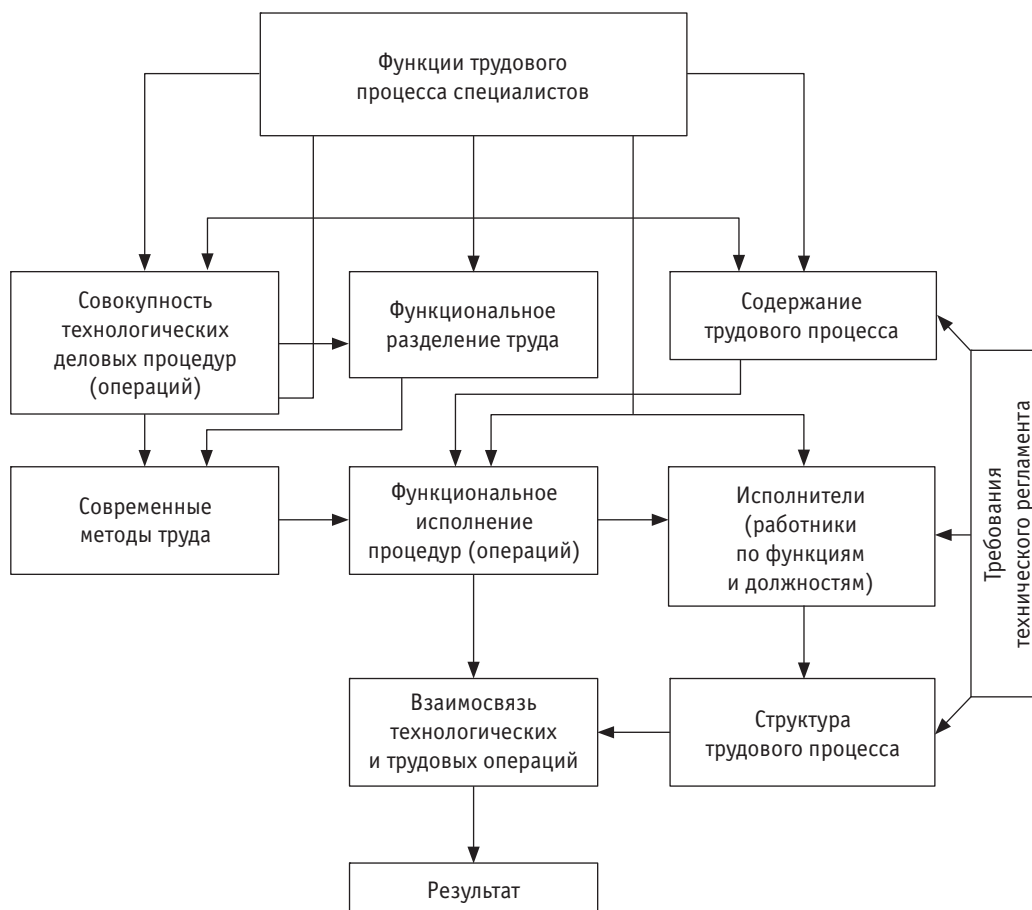


Рис. 1. Содержание трудового процесса специалистов

Нормативная трудоемкость сопоставляется с фактической. Величина последней рассчитывается как произведение числа рабочих дней в отчетном периоде, затраченных от поиска новшества до его внедрения на железной дороге. Полученное произведение, соотнесенное к средней величине отчетного периода (9 месяцев, квартал, год и т. д.) в процентах, характеризует величину трудоемкости работника, в зависимости от которой по соответствующей шкале определяется размер вознаграждения. По аналогичной схеме можно вести и контроль за качеством (количеством) работы подразделений со стороны вышестоящей организации.

Рассмотрим механизм определения нормативной трудоемкости. Допустим, что общая нормативная величина составляет $T_{н.ст}$, фактическая — $T_{ф}$.

Для вычислений устанавливается средний показатель трудоемкости в расчете на 1 человеко-день по подразделению. Будем считать, что $ЗП_{ст}$ — средняя заработная плата исполнителей конкретного подразделения на начало отчетного периода, а $ЗП_{нов}$ — на конец отчетного или начало следующего за ним периода. Величина нормативной трудоемкости в отчетном периоде, обозначаемая $T_{н.нов}$, определяется по формуле

$$T_{н.нов} = [T_{ф} + K(T_{н.ст} - T_{ф})]ЗП_{ст}/ЗП_{нов} \quad (2)$$

где K — коэффициент, устанавливающий долю снижения трудоемкости в пользу подразделения-исполнителя, он аналогичен величине ΔT , только она устанавливается в абсолютном виде в человеко-днях, а значение коэффициента K определяется в относительных единицах [5].

При установлении величин ΔT и K нужен дифференцированный подход с учетом степени новизны разработок, имеющих технических возможностей (технических средств) коллектива по выполнению тех или иных производственных показателей (факторов).

Практически снижение (повышение) нормативной трудоемкости осуществляется по работам, проведенным в отчетном периоде, в среднем на величину ΔT :

$$\Delta T = (T_{н.ст}/T_{н.нов} - 1) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

при этом следует иметь в виду, что корректировку нормативной трудоемкости одних операций можно вести в большей мере, других — в меньшей, но в среднем этот процесс должен соответствовать установленной величине ΔT .

Уточнение величины $T_{н.ст}$ позволяет контролировать нормативную трудоемкость таким образом, чтобы выполнялось следующее соотношение по основной заработной плате исполнителей:

$$T_{н.ст}ЗП_{ст} > T_{н.нов}ЗП_{нов} > T_{ф}ЗП_{нов} \quad (4)$$

Можно определять величину нормативной трудоемкости и по категориям персонала и видам трудоемкости — технологической, обслуживания, управления и т. д.

Далее рассмотрим распределение премиального фонда. Его часть, пропорциональная объему выполненной работы, определяется по формуле

$$\Phi_{ТО} = \sum_k P_k H_{3k}, \quad (5)$$

где P_k — количество единиц продукции k -го вида в плановом периоде;

H_{3k} — тарифная зарплатоемкость единицы продукции k -го вида.

Значения H_{3k} определяются на основе норм трудоемкости операций исполнителя. В ситуациях, когда прямое аналитическое нормирование работ по обслуживанию и управлению производством трудноосуществимо или заведомо неэффективно (затраты больше ожидаемого эффекта), целесообразно использовать метод распределения общепремимального фонда коллектива по ККТ или рейтинговой системе, разработанной в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) профессором А. В. Давыдовым и доцентом Т. В. Беляевой [6].

Реализовать указанные предложения по повышению эффективности труда и производства можно только с помощью подготовки качественно новой рабочей силы, которую составят работники основных и вспомогательных профессий компании «РЖД». Для этого можно рекомендовать следующую методику подготовки и переподготовки, а также найма рабочей силы для реализации современных бизнес-процессов компании «РЖД».

В 1–3-й разряды зачисляются работники, не прошедшие профессиональное обучение. К таким работникам на станции относятся станционные рабочие, вспомогательный технический персонал, обеспечивающий работу подсобных цехов и оборудования основных и вспомогательных производственных структур подразделений.

В 4-й квалификационный разряд — работники с двухлетним стажем и соответствующим сроком обучения. К ним относятся приемосдатчики груза и багажа, доставщики поездных документов, операторы различных постов, товарной конторы, ремонтники различных профессий и производств, помощники составителей и составители поездов на станциях 3-го и 4-го классов, операторы по паркам и постам МРЦ, дежурные по станциям 4-го и 5-го классов и т. д.

В 5–6-й разряд — работники с трехлетним стажем и обучением в учебных центрах железной дороги по специальным программам, прошедшие обучение и стажировку на факультете повышения квалификации в техникуме или вузе. К этой категории относятся дежурные по паркам и горкам, постам централизации, МРЦ, дежурные по маневровым районам станции, дежурные по станциям 2-го и 3-го классов, операторы при дежурных по станции, составители поездов и помощники составителей поездов в зависимости от напряженности маневровых районов, товарные кассиры, приемосдатчики груза, работники различных должностей центра подготовки поездных документов, ремонтники подвижного состава и различных технических устройств и оборудования и т. д.

В 7-й разряд — работники со стажем 3,5 года и обучением в вузе по специальным программам. Перечень таких профессий определяют отраслевые центральные дирекции и департаменты по функциям управления.

В 8-й разряд — лица, прошедшие 2-годичное обучение в техникуме и получившие высшую квалификацию или звание мастера.

К 9-му и 10-му относятся лица, зачисленные в резерв выдвижения для управления рабочими коллективами, бригада-

ми работников, обеспечивающие качественную реализацию планов, распоряжений и заданий в соответствии с технологическим процессом работы функциональных дирекций и производств по обеспечению скоростного и высокоскоростного движения в перевозке грузов и пассажиров и вспомогательных производственных структур, обслуживающих современных инновационные технологические процессы на железнодорожном транспорте.

Литература

1. Апенько С. Эффективность системы оценки персонала // Человек и труд. 2003. № 10. С. 73–74. ISSN 0132–1552.
2. Валентей С. Формирование национальной инновационной системы в России: проблемы и условия // Человек и труд. 2006. № 2. С. 52–60. ISSN 0132–1552.
3. Волгин Н. ВИЛАР: мотивационная основа эффективного труда // Человек и труд. 2000. № 4. С. 75–79. ISSN 0132–1552.
4. Волгин Н. А. Мотивационный механизм эффективного труда руководителя // Государственная кадровая политика: концептуальные основы, приоритеты, технологии реализации. М. : Изд-во РАГС, 1996.
5. Давыдов А. В., Милыева Л. Г., Бурмистров В. А. Методы оценки и стимулирования конкурентоспособности персонала : монография. Новосибирск : ОАО «Советская Сибирь», 2010.
6. Давыдов А. В., Беляева Т. В. Методика определения рейтинга железных дорог по НТИ /СГУПС : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 02.12.08 № 2565р.

References

1. Apenko S. Effektivnost sistemy otsenki personala [Effectiveness of personnel evaluation system] // Chelovek i trud. 2003. № 10. S. 73–74. ISSN 0132-1552.
2. Valentey S. Formirovanie natsionalnoy innovatsionnoy sistemy v Rossii: problemy i usloviya [Development of a national innovation system in Russia: problems and conditions] // Chelovek i trud. 2006. № 2. S. 52–60. ISSN 0132-1552.
3. Volgin N. VILAR: motivatsionnaya osnova effektivnogo truda [Motivational basis of effective labor] // Chelovek i trud. 2000. № 4. S. 75–79. ISSN 0132-1552.
4. Volgin N. A. Motivatsionniy mekhanizm effektivnogo truda rukovoditelya [Incentive mechanism of effective work of a manager] // Gosudarstvennaya kadrovaya politika: kontseptualnye osnovy, priority, tekhnologii realizatsii. M. : Izd-vo RAGS, 1996.
5. Davydov A. V., Milyaeva L. G., Burmistrov V. A. Metody otsenki i stimulirovaniya konkurentosposobnosti personala : monografiya [Methods for evaluation and promotion of staff competitiveness : a monograph]. Novosibirsk : ОАО «Sovetskaya Sibir», 2010.
6. Davydov A. V., Belyaeva T. V. Metodika opredeleniya reytinga zheleznikh dorog po NTI [Methods of determining railway ranking on STI] / SGUPS : utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» 02.12.08 № 2565r.

УДК 656.2.021.5:625.11

Наталья Станиславовна Нестерова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь и проектирование железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, **Владимир Александрович Анисимов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь и проектирование железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО УЧАСТКА

Natalya Stanislavovna Nesterova, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Track and Railroad Design, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, **Vladimir Alexandrovich Anisimov**, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Track and Railroad Design, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk

A method to determine operating reliability of a railway section

Аннотация

В статье рассмотрено влияние частичных отказов постоянных устройств и сооружений железной дороги на эксплуатационную надежность двухпутного участка. Для этой цели использованы два критерия — вероятность превышения потребной пропускной способности над наличной и математическое ожидание потерь времени в поезде-часах. Применение в расчетах указанных критериев позволяет принимать научно обоснованные проектные решения, направленные на увеличение мощности и надежности участков железных дорог. На основе выполненных расчетов предложена методика оценки эксплуатационной надежности железнодорожного участка.

Ключевые слова: пропускная способность железных дорог, надежность функционирования, неопределенность, критерии надежности, частичный отказ.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-35-40

Summary

The article considers the influence of partial failures of permanent railway equipment and facilities on operational reliability of a double-track section. For this purpose, two criteria have been used — probability of non-exceedance of required traffic capacity over the available capacity and mathematic expectation of loss of time in train-hours. The application of these criteria in the calculations allows to create scientifically reasoned design solutions to increase capacity and reliability of rail sections. On the basis of the calculations, a method to estimate operational reliability of a railway section has been proposed.

Keywords: capacity of railways, operational reliability, uncertainty, reliability criteria, partial failure.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-35-40

Эффективное функционирование участков железнодорожных линий невозможно без обеспечения эксплуатационной надежности их элементов (постоянных устройств и сооружений), которая снижается из-за несвоевременного проведения планово-предупредительных ремонтов, старения основных фондов и других причин. Как следствие, увеличивается число отказов, вызывающих предупреждения об ограничении скорости движения поездов. В результате фактическая пропускная способность железной дороги, определенная по исполненному графику движения, ниже наличной, рассчитанной по инструкции [1].

С учетом вероятностной природы наличной и потребной пропускной способности устойчивая работа транспортной системы может быть обеспечена за счет резервов мощности, при которых потребные размеры движения не будут превышать наличную пропускную способность. В [2] под отказом железнодорожного участка предложено понимать превышение потребной пропускной способности над наличной, т. е. для бесперебойной работы минимальная наличная пропускная способность должна быть больше максимальных размеров движения.

На основании вышесказанного в [3] для учета надежности функционирования элементов железнодорожного участка при планировании мероприятий по увеличению его мощности предложено использовать следующие критерии:

вероятность превышения потребной пропускной способности над наличной $P(N_n < N_{\text{н}})$;

математическое ожидание потерь времени в поезде-часах $M(t_{\text{пот}})$.

Количественную эффективность работы железнодорожного участка с учетом надежности функционирования его элементов характеризует $P(N_n < N_{\text{н}})$, качественную — $M(t_{\text{пот}})$ [3].

Определение этих критериев основано на понятии потока отказов w_p , а именно на последовательности появления отказов на железнодорожном участке за расчетный период.

Рассматриваемые в данном исследовании расчеты выполнены для двухпутного электрифицированного железнодорожного участка Дальневосточного полигона (рис. 1), оборудованного автоблокировкой при пакетном графике движения поездов.

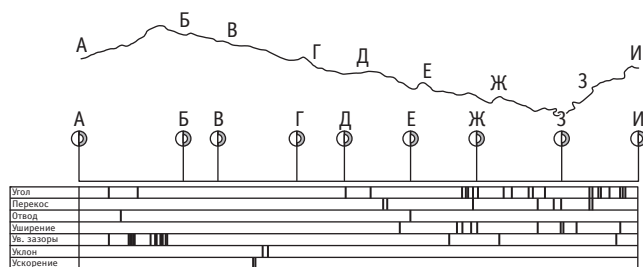


Рис. 1. Схема железнодорожного участка А — И с расположением выданных предупреждений об ограничении скорости движения поездов за период с 1 января по 3 марта 2014 г.

Для определения возможной пропускной способности собрана информация о техническом состоянии участка: параметры плана и продольного профиля, пикетаж входных, выходных и проходных светофоров, длительные предупреждения об ограничении скорости движения поездов, а также другие параметры, необходимые для выполнения тяговых расчетов. С целью исследования динамики изменения потока отказов и их влияния на возможную пропускную способность использованы данные о временных и краткосрочных предупреждениях об ограничении скорости движения поездов с 1 января по 3 марта 2014 г. (см. рис. 1). Протяженность участка составляет 127 км. Количество длительных предупреждений — 75, из них предупреждения об ограничении скорости до 40 км/ч выданы на протяженность 2 км, 50 км/ч — 1,2 км, 60 км/ч — до 1 км, 65 км/ч — 16,3 км, 70 км/ч — 12,4 км и 75 км/ч — на 13,1 км. Анализ плана и продольного профиля показывает, что рассматриваемый участок характеризуется достаточно спокойным рельефом местности, так как более половины его длины проходит вдоль долины реки и представлено прямыми и кривыми > 1200 м, кривые с радиусом до 600 м составляют свыше 20 % (рис. 2), при руководящем уклоне в 9 ‰ горизонтальные и участки с уклонами до 4 ‰ занимают чуть меньше половины всей длины (рис. 3).

Данные о временных и краткосрочных предупреждениях на перегонах железнодорожного участка А — И систематизированы и классифицированы по ограничению скорости, причине выдачи и упорядочены по времени действия и расположению на участке. Всего за расчетный период выдано чуть менее 60 предупреждений на общую протяженность 21,5 км (рис. 1, 4, 5). На рис. 5 представлены четыре перегона железнодорожного участка А — И с большим количеством предупреждений об ограничении скорости движения поездов до 25, 40, 60 и 75 км/ч. На двух перегонах, Б — В и Г — Д, выдача предупреждений отсутствовала. Четыре предупреждения об ограничении скорости до 75 км/ч выданы на перегоне В — Г, пять предупреждений об ограничении скорости до 60 км/ч — на перегоне Д — Е. На перегонах Е — Ж и Ж — З основная допускаемая скорость установлена в 75 км/ч, на остальных перегонах — в 80 км/ч.

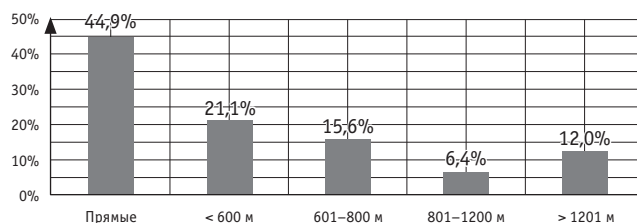


Рис. 2. Доля кривых различных радиусов на железнодорожном участке А — И

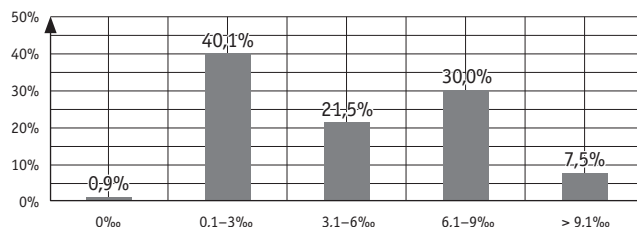


Рис. 3. Доля элементов продольного профиля различных уклонов на железнодорожном участке А — И

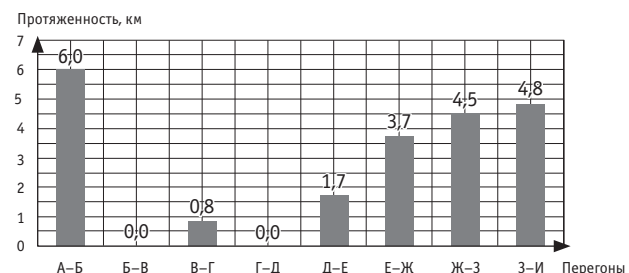


Рис. 4. Общая протяженность выданных кратковременных предупреждений об ограничении скорости движения поездов за расчетный период

В расчетах в качестве отказов устройств и сооружений перегонов участка приняты только неисправности верхнего строения пути — перекас, увеличенные зазоры, угол, уклон, ускорение, уширение, отвод.

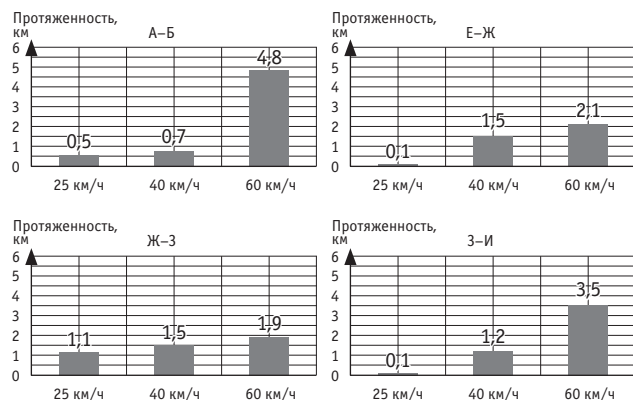


Рис. 5. Протяженность предупреждений об ограничении скорости движения поездов по четырем перегонам железнодорожного участка А — И

Для каждого отказа определены продолжительность действия t_{bj} (сут) и по результатам тяговых расчетов, выполненных с помощью программы ИСКРА-ПТЭР 2.9 [4], — потери времени хода грузового поезда t_{oj} (мин).

На основе полученных и обработанных статистических данных об j -х отказах i -х устройств и сооружений перегонов участка для каждого i -го устройства и сооружения за расчетный интервал времени $T_{расч} = 0,17$ года (62 сут) установлены параметры потока отказов w_{ij} , математическое ожидание потерь времени хода грузовых поездов из-за отказов $M(t_{oi})$ и математическое ожидание квадрата потерь времени хода $M(t_{oi}^2)$ по формулам:

$$M(t_{oi}) = \frac{1}{365T_{расч}} \sum_{j=1}^{w_i} t_{oj} t_{vij}; \quad (1)$$

$$M(t_{oi}^2) = \frac{1}{365T_{расч}} \sum_{j=1}^{w_i} t_{oj}^2 t_{vij}, \quad (2)$$

где t_{oj} — потери времени хода грузового поезда из-за j -го отказа, мин;

t_{vij} — продолжительность действия j -го отказа, сут.

По результатам тяговых расчетов для каждого перегона исследуемого участка определены значения межпоездного интервала грузовых поездов по графику $I^{граф}$, математическое ожидание $M(I)$ межпоездного интервала и среднеквадратичное отклонение времени хода σ_I по формулам:

$$M(I) = I^{граф} + \sum_{i=1}^{k_{уст}} M(t_{oi}); \quad (3)$$

$$\sigma_I = \sqrt{\sum_{i=1}^{k_{уст}} (M(t_{oi}^2) + [M(t_{oi})]^2)}, \quad (4)$$

где $k_{уст}$ — количество устройств и сооружений на перегоне.

Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение пропускной способности перегонов (табл. 1) рассчитаны следующим образом:

$$M(N_H) = \frac{(1440 - t_{тех})}{M(I)} - \sum_{i=1}^{k_H} \varepsilon_i N_i; \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{0,5 \cdot \sigma_I \sqrt{4T_p M(I) + 9\sigma_I^2 - 3\sigma_I}}{[M(I)]^2}, \quad (6)$$

где $t_{тех}$ — продолжительность технологического окна, мин;

k_H — количество категорий поездов;

ε_i — коэффициент съема грузовых поездов i -й категории поездов;

N_i — число поездов i -й категории;

T_p — продолжительность расчетного периода, за который определяется пропускная способность,

$$T_p = (1440 - t_{тех}) - \sum_{i=1}^{k_H} \varepsilon_i N_i M(I). \quad (7)$$

Таблица 1

Результаты расчета математического ожидания и среднеквадратичного отклонения наличной пропускной способности перегонов

Перегон	$M(t_{oi})$	$M(t_{oi}^2)$	$I^{граф}$	$M(I)$	$M(N_H)$	σ_H	$N_{нал}$ при $I = 8$ мин
А — Б	2,78	46,21	7,03	9,81	115	7,25	154
Б — В	0,00	0,00	10,96	10,96	101	0,00	
В — Г	0,00	0,00	7,56	7,56	154	0,00	
Г — Д	0,00	0,00	6,66	6,66	177	0,00	
Д — Е	0,17	0,17	8,08	8,25	140	0,63	
Е — Ж	2,21	29,66	8,22	10,43	107	5,39	
Ж — З	0,37	0,70	10,47	10,84	102	0,84	
З — И	0,66	1,21	7,18	7,84	148	1,96	

При выполнении дальнейших расчетов заданными принимаем математическое ожидание $M(N_H) = 80$ поездов/сут и среднеквадратичное отклонение $\sigma_H = 11$ поездов/сут потребной пропускной способности в грузовом направлении. Для каждого перегона определяем вероятность неперевышения потребной пропускной способности над наличной $P(N_H < N_H)$, с этой целью из уравнения (8) находим точку пересечения кривых плотности вероятности n_0 (рис. 6):

$$\frac{1}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(n_0 - \bar{N}_H)^2}{2\sigma_H^2}\right) = \frac{1}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(n_0 - \bar{N}_H)^2}{2\sigma_H^2}\right). \quad (8)$$

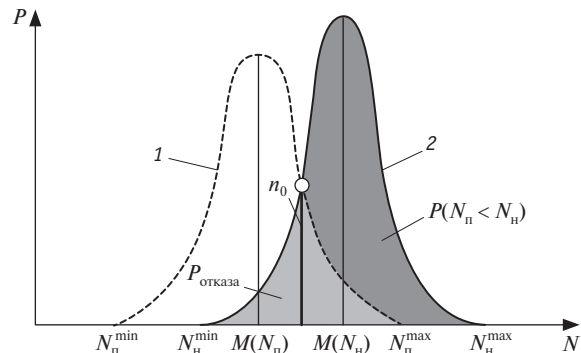


Рис. 6. Принципиальная схема определения неперевышения потребной пропускной способности над наличной по железнодорожному участку:

1 — дифференциальная кривая плотности вероятности потребной пропускной способности; 2 — то же наличной пропускной способности

После соответствующих преобразований используем квадратное уравнение [3]

$$A \cdot n_0^2 - B \cdot n_0 + C = 0, \quad (9)$$

где

$$A = \sigma_H^2 - \sigma_H^2;$$

$$B = 2 \cdot (\sigma_H^2 \cdot \bar{N}_H - \sigma_H^2 \cdot \bar{N}_H);$$

$$C = (\sigma_n \cdot \bar{N}_n)^2 - (\sigma_n \cdot \bar{N}_n)^2 - 2 \cdot (\sigma_n \cdot \sigma_n)^2 \ln \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n} \right);$$

$$\bar{N}_n = M(N_n);$$

$$\bar{N}_n = M(N_n).$$

Решая данное уравнение, находим искомую точку n_0 (табл. 2) и вычисляем вероятность неперевышения потребной пропускной способности над наличной:

$$P(N_n < N_n) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_{n_0}^{N_n^{\max}} \exp \left(-\frac{(n_0 - \bar{N}_n)^2}{2\sigma_n^2} \right) dn - \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_{n_0}^{N_n^{\max}} \exp \left(-\frac{(n_0 - \bar{N}_n)^2}{2\sigma_n^2} \right) dn. \quad (10)$$

Таблица 2

Результаты расчета точки пересечения кривых плотности вероятности n_0

Перегон	A	B	C	D	n_{01}	n_{02}
A — Б	68,43	-19 545,13	1 272 995,39	33 551 120,3	100,48	185,13
Б — В	121,00	-24 611,58	1 251 507,65	0,02	101,70	101,70
В — Г	121,00	-37 421,65	2 893 346,99	0,17	154,63	154,64
Г — Д	121,00	-43 001,87	3 820 580,88	0,38	177,69	177,70
Д — Е	120,60	-33 907,43	2 381 595,96	841 154,59	136,78	144,38
Е — Ж	91,96	-21 400,34	1 210 834,20	12 574 321,17	97,07	135,63
Ж — З	120,29	-24 806,60	1 278 144,25	395 814,91	100,50	105,73
З — И	117,17	-35 330,97	2 643 136,69	9 443 298,79	137,65	163,87

После приведения интегралов с помощью нормальной функции распределения [5] формула (10) приобретает вид

$$P(N_n < N_n) = \left[1 - \Phi \left(\frac{n_0 - \bar{N}_n}{\sigma_n} \right) \right] - \left[1 - \Phi \left(\frac{n_0 - \bar{N}_n}{\sigma_n} \right) \right], \quad (11)$$

а после уточнения:

$$P(N_n < N_n) = \Phi \left(\frac{n_0 - \bar{N}_n}{\sigma_n} \right) - \Phi \left(\frac{n_0 - \bar{N}_n}{\sigma_n} \right). \quad (12)$$

Вероятность неперевышения потребной пропускной способности над наличной для всего участка А — И определяем следующим образом:

$$P(N_n < N_n) = \prod_{k=1}^{k_{\text{пер}}} P_k(N_n < N_n), \quad (13)$$

где $k_{\text{пер}}$ — количество перегонов железнодорожного участка; $P_k(N_n < N_n)$ — вероятность неперевышения потребной пропускной способности над наличной для k -м перегона.

Второй критерий — математическое ожидание потерь времени хода в поезд-часах — вычисляется по формуле

$$M(t_{\text{пот}k}) = 365 \cdot T_{\text{расч}} \cdot M(N_n) \cdot \sum_{j=1}^{k_{\text{пер}}} M(t_{\text{от}j}) / 60. \quad (14)$$

Если математическое ожидание потерь времени в поезд-часах определяется для каждого перегона, то в целом для участка его можно рассчитать следующим образом:

$$M(T_{\text{пот}}) = \sum_{k=1}^{k_{\text{пер}}} M(t_{\text{пот}k}), \quad (15)$$

где $M(t_{\text{пот}k})$ — математическое ожидание потерь времени в поезд-часах k -го перегона.

Результаты расчетов, выполненных по формулам (8)–(15), приведены в табл. 3. Анализируя их, можно отметить, что за 62 сут расчетного периода выданные краткосрочные предупреждения об ограничении скорости движения поездов из-за отказов верхнего строения пути привели к снижению наличной пропускной способности. Надежность функционирования участка А — И по освоению потребного объема перевозок за $T_{\text{расч}}$ оцениваемая с помощью вероятности неперевышения потребной пропускной способности над наличной, составила 0,8187, или 81,87 %. Перегоны А — Б, Б — В, Е — Ж и Ж — З показали надежность функционирования по данному критерию меньше 1 (соответственно 0,9492; 0,9756; 0,9144 и 0,96685) и являются узкими местами, на которых могли возникать затруднения с пропуском поездов за рассматриваемый период времени.

Влияние частичных отказов постоянных устройств и сооружений на качественные показатели функционирования железнодорожного участка А — И (участковую скорость, производительность локомотивов, оборот вагонов) определено с помощью второго критерия [формулы (14)–(15)]. Как показал расчет, наибольшие потери времени в поезд-часах за $T_{\text{расч}}$ имеют перегоны А — Б и Е — Ж. Если эти потери умножить на стоимость 1 поезд-часа, то получим возможный экономический эффект от мероприятий, повышающих эксплуатационную надежность участка.

Следует отметить, что расчет выполнен только с учетом частичных отказов верхнего строения пути. Если учитывать влияние всех технических и технологических отказов [6], то оценка эксплуатационной надежности железнодорожного участка А — И с использованием предложенных критериев будет существенно ниже.

На основе расчетов авторами разработана методика оценки эксплуатационной надежности железнодорожного участка с применением критериев, предложенных в [3]. Блок-схема методики представлена на рис. 7.

Заключение. Таким образом, рассчитанные выше критерии позволяют учесть влияние надежности функционирования элементов железнодорожного участка на его реальную (наличную) мощность и качество работы. Более точные результаты можно получить при организации постоянно действующего мониторинга отказов в работе элементов исследуемой системы. Синтез и анализ полученной статистической информации позволяет определять качество технического состояния участков железнодорожной линии, а значит, своевременно планировать мероприятия по ликвидации отказов и обеспечению безопасной и бесперебойной работы железной дороги.

Таблица 3

Определение вероятности непревышения потребной пропускной способности над наличной по перегонам

Перегон	$\frac{n_0 - M(N_n)}{\sigma_n}$	$\Phi\left(\frac{n_0 - M(N_n)}{\sigma_n}\right)$	$\frac{n_0 - M(N_n)}{\sigma_n}$	$\Phi\left(\frac{n_0 - M(N_n)}{\sigma_n}\right)$	$P_k(N_n < N_n)$	$M(t_{\text{потк}})$, поездов/ч
А — Б	1,86	0,96860	-2,07	0,01937	0,949230	229,87
Б — В	1,97	0,97560	-5,18	0,00000	0,975600	0,00
В — Г	6,78	1,00000	-8,23	0,00000	1,000000	0,00
Г — Д	8,88	1,00000	-10,01	0,00000	1,000000	0,00
Д — Е	5,16	1,00000	-5,69	0,00000	1,000000	14,00
Е — Ж	1,55	0,93940	-1,96	0,02500	0,914400	183,20
Ж — З	1,86	0,96860	-2,93	0,00175	0,966850	30,80
З — И	5,24	1,00000	-5,56	0,00000	1,000000	54,67
$P(N_n < N_n) =$					0,818726	512,54

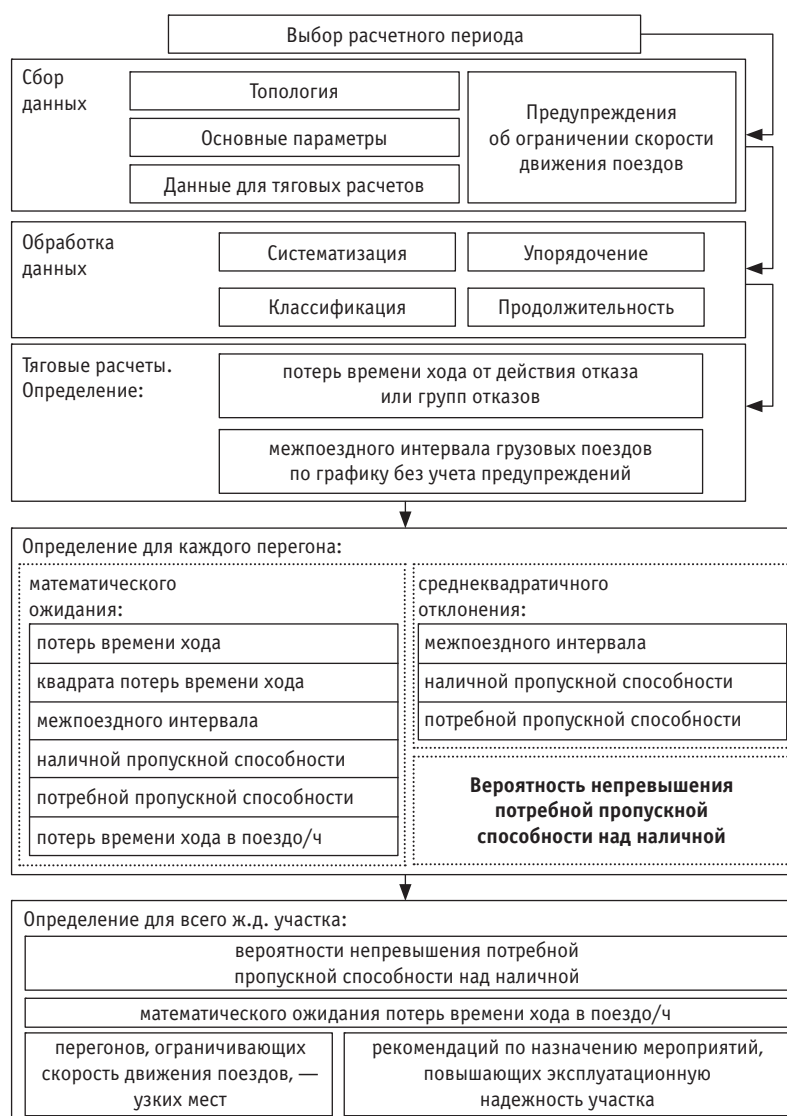


Рис. 7. Блок-схема методики оценки эксплуатационной надежности железнодорожного участка

Литература

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М. : Изд-во «ТЕХИНФОРМ», 2011. 290 с.
2. Правдин Н. В., Дыканюк М. Л., Негрей В. Я. Прогнозирование грузовых потоков. М. : Транспорт, 1987. 247 с.
3. Анисимов Вл. А., Гончарук С. М. Критерии оценки мероприятий по увеличению мощности железной дороги с учетом надежности функционирования ее элементов // Выбор технических параметров и вопросы теории проектирования железных дорог в условиях Дальнего Востока : сб. науч. тр. Хабаровск : ХаБииЖТ, 1992. С. 72–80.
4. Анисимов В. А., Анисимов В. В., Левченко О. А. Тягово-экономические расчеты при проектировании и эксплуатации железных дорог : учеб. пособие. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. 79 с.
5. Правдин Н. В., Негрей В. Я. Прогнозирование пассажирских потоков (методика, расчеты, примеры). М. : Транспорт, 1980. 222 с.
6. Автоматизированная система анализа выполнения графика движения поездов // Актуальные проблемы развития железных дорог региона : сб. науч. тр. / Вл. А. Анисимов, В. А. Крапивный, А. И. Баткин и др. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. С. 41–51.

References

1. Instruktsiya po raschyotu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Instructions on the calculation of available traffic capacity of railways]. M. : Izd-vo «TEKhINFORM», 2011. 290 s.
2. Pravdin N. V., Dykanyuk M. L., Negrey V. Ya. Prognozirovaniye gruzovykh potokov [Forecasting freight flows]. M. : Transport, 1987. 247 s.
3. Anisimov V. A., Goncharuk S. M. Kriterii otsenki meropriyatiy po uvelicheniyu moshchnosti zheleznoy dorogi s uchyotom nadezhnosti funktsionirovaniya eyo elementov [Criteria for evaluating measures to increase railway capacity taking into account operational reliability of its elements] // Vybory tekhnicheskikh parametrov i voprosy teorii proektirovaniya zheleznykh dorog v usloviyakh Dalnego Vostoka : sb. nauch. tr. Khabarovsk : KhabIIZhT, 1992. S. 72–80.
4. Anisimov V. A., Anisimov V. V., Levchenko O. A. Tyagovo-ekonomicheskie raschyoty pri proektirovanii i ekspluatatsii zheleznykh dorog : ucheb. posobie [Traction and economic calculations for the design and operation of railways : a textbook]. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2008. 79 s.
5. Pravdin N. V., Negrey V. Ya. Prognozirovaniye passazhirskikh potokov (metodika, raschyoty, primery) [Forecasting passenger flows (methodology, calculations, examples)]. M. : Transport, 1980. 222 s.
6. Avtomatizirovannaya sistema analiza vypolneniya grafika dvizheniya poezdov [Automated system for analysis of train schedule compliance] // Aktualnye problemy razvitiya zheleznykh dorog regiona : sb. nauch. tr. / V. A. Anisimov, V. A. Krapivniy, A. I. Batkin i dr. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2004. S. 41–51.

УДК 656.22:620.9

Елена Анатольевна Сидорова, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Информатика, прикладная математика и механика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Светлана Олеговна Подгорная, инженер Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ НА РАСХОД ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

Elena Anatolyevna Sidorova, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of Department of Computer Science, Applied Mathematics and Mechanics, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Svetlana Olegovna Podgornaya, Engineer, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk

Effect of locomotive utilization rate on energy consumption in freight traffic

Аннотация

Железнодорожный транспорт — крупнейший потребитель топливно-энергетических ресурсов. Основной объем энергопотребления на железной дороге приходится на тягу поездов. В числе прочих факторов на него оказывают влияние показатели использования локомотивов — средняя масса поезда, нагрузка на ось вагона, техническая скорость движения, коэффициент участковой скорости, доля порожнего пробега грузовых вагонов. Статья посвящена оценке изменения удельного расхода энергоресурсов на тягу поездов в грузовом движении за счет изменения показателей использования локомотивов на различных уровнях организационной структуры ОАО «РЖД». Приведены соответствующие расчетные формулы, в том числе новая формула для учета влияния изменения коэффициента участковой скорости.

Ключевые слова: энергопотребление, удельный расход энергоресурсов, качественные показатели использования локомотивов, параметры осредненного локомотива, уравнение тягово-энергетического баланса, коэффициент влияния.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-41-45

Summary

Rail transport is the largest consumer of energy resources. Traction accounts for the bulk of energy consumption in railway industry. Among other factors, energy consumption is affected by utilization rates of locomotives — average weight of train, car axle load, route speed, service speed ratio, the share of empty runs of freight cars. The article is devoted to evaluation of changes in the specific consumption of energy for traction in freight traffic resulting from the changes in utilization rates of locomotives at different levels of JSC Russian Railways structure. The corresponding calculation formulas are provided, including a new formula to take into account the effect of changes in service speed ratio.

Keywords: energy consumption, specific consumption of energy resources, quality indicators of locomotive utilization, averaged locomotive parameters, traction and energy balance equation, influence factor.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-41-45

Составной частью анализа энергопотребления на тягу поездов в структурных подразделениях железнодорожного транспорта является определение величины изменения удельного расхода энергии (УРЭ) на единицу перевозочной работы в отчетном периоде относительно аналогичного прошлого периода, называемого базовым, за счет изменения качественных показателей использования локомотивов. При этом в первую очередь рассматривается влияние таких факторов, как средняя масса поезда, нагрузка на ось вагона, техническая скорость движения, коэффициент участковой скорости, доля порожнего пробега грузовых вагонов [1]. Изменение величины энергозатрат вследствие изменения каждого из перечисленных показателей оценивается с помощью специального коэффициента влияния, характеризующего относительное (в процентах) изменение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), обусловленное изменением этого показателя на 1 % или принятую единицу его измерения.

До недавнего времени определение коэффициентов влияния осуществлялось в соответствии с «Методикой анализа результатов расхода ТЭР на тягу поездов № ЦТД-26» [2], однако к настоящему времени она потеряла актуальность и нуждается в совершенствовании. Следует отметить, что формулы для расчета некоторых коэффициентов влияния отличаются в разных литературных источниках и нормативных документах, а в отдельных случаях приводятся только их конкретные обобщенные значения.

Значения коэффициентов влияния следует определять для каждого структурного подразделения и анализируемого календарного периода, поскольку вследствие специфики перевозочного процесса на разных железных дорогах имеются существенные количественные различия одних и тех же показателей, в отдельных случаях превышающие 50 %. В качестве примера в табл. 1 приведены минимальные и максимальные значения показателей использования локомотивов в грузовом движении на всех железных дорогах России на электрической тяге за январь 2014 г. и на дизельной тяге за июль 2013 г.

Расхождение минимального и максимального значений каждого показателя рассчитано по формуле

$$\delta = \left(\frac{\Pi_{i\max}}{\Pi_{i\min}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (1)$$

где $\Pi_{i\max}$, $\Pi_{i\min}$ — максимальное и минимальное значение i -го показателя соответственно.

Таблица 1

Диапазоны изменения значений показателей использования локомотивов в грузовом движении на сети железных дорог России

Показатель	Масса поезда, т	Нагрузка на ось вагона, т	Техническая скорость, км/ч	Коэффициент участковой скорости, %	Доля порожнего пробега вагонов, %
<i>Электрическая тяга, январь 2014 г.</i>					
Минимальное значение	3351	14,0	43,5	66,1	34,4
Максимальное значение	4409	15,3	57,2	92,1	46,6
Расхождение δ , %	31,6	9,3	31,5	39,3	35,5
<i>Дизельная тяга, июль 2013 г.</i>					
Минимальное значение	2901	13,2	37,9	66,7	33,3
Максимальное значение	4019	17,3	54,7	97,8	54,2
Расхождение δ , %	38,5	31,1	44,3	46,6	62,8

Расчет коэффициентов влияния показателей использования локомотивов выполняют по следующим обобщенным формулам [2]:

средней массы поезда и нагрузки на ось вагона

$$\beta_i = \frac{\Pi_i}{b} \cdot \frac{db}{d\Pi_i}; \quad (2)$$

средней технической скорости, коэффициента участковой скорости и доли порожнего пробега грузовых вагонов

$$\beta_i = \frac{100}{b} \cdot \frac{db}{d\Pi_i}, \quad (3)$$

где Π_i — значение i -го показателя в отчетном периоде;

b — удельный расход ТЭР в базовом периоде, кВт·ч (кг)/10 тыс. т·км брутто;

$\frac{db}{d\Pi_i}$ — частный дифференциал удельного расхода ТЭР по i -му показателю.

Удельный расход ТЭР на поездку определяется по уравнению тягово-энергетического паспорта локомотива

$$b = \frac{I_T}{Q \cdot \eta} \cdot \left(\frac{K_x \cdot K_{bx} \cdot N_{KH}}{V_{tex}} + \frac{K_{tc} - K_x \cdot K_{bx}}{367,2} \times \right. \\ \left. \times (P + Q) \cdot (w_o + i) \right), \quad (4)$$

где I_T — индекс вида тяги, для электрической тяги — 10000, для дизельной — 843;

Q — средняя масса поезда, т;

η — номинальный коэффициент полезного действия (КПД) локомотива;

K_x — коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования локомотива на холостом ходу;

K_{bx} — коэффициент, характеризующий относительный расход ТЭР на холостом ходу;

N_{KH} — номинальная касательная мощность локомотива, кВт;

V_{tex} — средняя техническая скорость движения, км/ч;

K_{tc} — коэффициент технического состояния локомотива;

P — сцепной вес локомотива, т;

w_o — основное удельное сопротивление движению поезда, кгс/т, определяется согласно [3];

i — дополнительное удельное сопротивление движению поезда от уклона, ‰.

Коэффициенты влияния показателей использования локомотивов на электрической тяге определяются без учета небаланса электроэнергии на тягу поездов.

Для использования уравнения (4) на уровне структурного подразделения целесообразно выполнить ряд преобразований с учетом определенных допущений. Часть показателей, которые входят в уравнение (4), в свою очередь, зависят от множества других факторов. Например, основное удельное сопротивление движению поезда w_o включает в себя сопротивление движению локомотивов w'_o и вагонов w''_o . Указанные показатели отличаются для разных типов пути, типов вагонов и средней нагрузки на ось грузового вагона $q_{гр}$. В связи с этим величину w_o следует определять как средневзвешенное значение с учетом доли различных составляющих:

$$w_o = w'_o + w''_o = \\ = w'_{o.бп} \cdot M_{бп} + w'_{o.зп} \cdot M_{зп} + w''_{o.бп} \cdot M_{бп} + w''_{o.зп} \cdot M_{зп}, \quad (5)$$

где $M_{бп}$, $M_{зп}$ — доля бесстыкового и звеньевого пути соответственно.

Для расчета основного удельного сопротивления движению локомотивов в [3] приведены следующие математические формулы:

на бесстыковом пути

$$w'_{o.бп} = 1,9 + 0,008 \cdot V_{tex} + 0,00025 \cdot V_{tex}^2; \quad (6)$$

на звеньевом пути

$$w'_{o.зп} = 1,9 + 0,01 \cdot V_{tex} + 0,0003 \cdot V_{tex}^2. \quad (7)$$

Представив долю звеньевого пути как $(1 - M_{бп})$ и введя дополнительные коэффициенты $A_{л}$ и $B_{л}$, получим следующее выражение для расчета w'_o :

$$w'_o = 1,9 + A_{\text{л}} \cdot V_{\text{тех}} + B_{\text{л}} \cdot V_{\text{тех}}^2, \quad (8)$$

где

$$A_{\text{л}} = 0,002 \cdot (5 - M_{\text{бп}}); \quad (9)$$

$$B_{\text{л}} = 0,00005 \cdot (6 - M_{\text{бп}}). \quad (10)$$

Основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов согласно [3] определяется по формулам: на бесстыковом пути

$$w''_{\text{о.бп}} = w''_{\text{о.п.бп}} \cdot M_{\text{п}} + w''_{\text{о.груз.бп}} \cdot M_{\text{груз}}; \quad (11)$$

на звеньевом пути

$$w''_{\text{о.зп}} = w''_{\text{о.п.зп}} \cdot M_{\text{п}} + w''_{\text{о.груз.зп}} \cdot M_{\text{груз}}, \quad (12)$$

где $w''_{\text{о.п.}}$, $w''_{\text{о.груз}}$ — основное удельное сопротивление движению порожних и груженых вагонов соответственно, кгс/т (обозначения в индексах «бп» и «зп» характеризуют показатели для бесстыкового и звеньевого пути соответственно);

$M_{\text{п}}$, $M_{\text{груз}}$ — доля порожних и груженых вагонов соответственно.

Следует отметить, что в [3] также имеются формулы для определения основного удельного сопротивления движению вагонов на роликовых подшипниках и на подшипниках скольжения. Однако в связи с тем что в настоящее время подавляющее большинство колесных пар подвижного состава оснащено роликовыми подшипниками, дополнительно учитывать в выражениях (11) и (12) распределение вагонов по типам подшипников нецелесообразно, а все расчеты для упрощения следует выполнять по формулам для вагонов на роликовых подшипниках.

На сети железных дорог Российской Федерации зарегистрировано более 1 млн грузовых вагонов, в том числе 6-осных — 0,04 % от общего количества, 8-осных — 0,15 %. В табл. 2 приведено основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов на роликовых подшипниках с разным количеством осей при различных скоростях движения на бесстыковом пути. Расчеты выполнены для груженых вагонов при $q_{\text{гр}} = 21$ т, для порожних — при $q_{\text{гр}} = 5,5$ т. Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что в некоторых случаях в сопоставимых условиях значения сопротивления движению вагонов с разным количеством осей отличаются довольно существенно. Однако, учитывая, что доля 6- и 8-осных вагонов очень мала, а их распределение в составах поездов неравномерно и непредсказуемо, для определения общего основного удельного сопротивления движению вагонов с достаточной степенью точности можно применять формулы, предусмотренные для 4-осных вагонов.

Следует отметить, что сопротивление движению поезда также зависит от состояния пути, конструкции и технического состояния подвижного состава и ряда других особенностей, объективно оценить и учесть которые не представляется возможным. Например, на железных дорогах эксплуатируются грузовые вагоны различных типов (крытые, полувагоны, цистерны, думпкары, хопперы, платформы и др.), однако в [3] формулы расчета сопротивления движению для них не детализированы.

Таблица 2

Основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов

Тип вагона	Формулы для расчета w''_o на бесстыковом пути	Значение w''_o , кгс/т, при $V_{\text{тех}}$	
		40 км/ч	80 км/ч
Порожние вагоны ($q_{\text{гр}} \leq 6$ т)			
4-осный, 6-осный	$w''_o = 1,0 + 0,042 \cdot V_{\text{тех}} + 0,00016 \cdot V_{\text{тех}}^2$	2,936	5,384
8-осный	$w''_o = 0,7 + \frac{6 + 0,026 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0017 \cdot V_{\text{тех}}^2}{q_{\text{гр}}}$	2,475	4,147
Расхождение значений w''_o для 4(6)- и 8-осных вагонов, %		18,6	29,8
Груженные вагоны ($q_{\text{гр}} > 6$ т)			
4-осный	$w''_o = 0,7 + \frac{3 + 0,09 \cdot V_{\text{тех}} + 0,002 \cdot V_{\text{тех}}^2}{q_{\text{гр}}}$	1,167	1,795
6-осный	$w''_o = 0,7 + \frac{8 + 0,08 \cdot V_{\text{тех}} + 0,002 \cdot V_{\text{тех}}^2}{q_{\text{гр}}}$	1,386	1,995
8-осный	$w''_o = 0,7 + \frac{6 + 0,026 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0017 \cdot V_{\text{тех}}^2}{q_{\text{гр}}}$	1,165	1,603
Расхождение значений w''_o для 4- и 6-осных вагонов, %		−15,8	−10,0
Расхождение значений w''_o для 4- и 8-осных вагонов, %		0,2	12,0

Учитывая вышесказанное и вводя дополнительные коэффициенты $A_{\text{гр}}$, $B_{\text{гр}}$ и $C_{\text{гр}}$ получаем следующее общее выражение для определения основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов:

$$w''_{\text{o}} = A_{\text{гр}} + B_{\text{гр}} \cdot V_{\text{тех}} + C_{\text{гр}} \cdot V_{\text{тех}}^2, \quad (13)$$

где

$$A_{\text{гр}} = 0,7 + 0,3 \cdot M_{\text{п}} + 3 \cdot \frac{(1 - M_{\text{п}})}{q_{\text{гр}}}; \quad (14)$$

$$B_{\text{гр}} = 0,002 \cdot M_{\text{п}} \cdot (22 - M_{\text{бп}}) + 0,1 \cdot \frac{(1 - M_{\text{п}}) \cdot (1 - 0,1 \cdot M_{\text{бп}})}{q_{\text{гр}}}; \quad (15)$$

$$C_{\text{гр}} = 0,00008 \cdot M_{\text{п}} \cdot (3 - M_{\text{бп}}) + 0,0025 \cdot \frac{(1 - M_{\text{п}}) \cdot (1 - 0,2 \cdot M_{\text{бп}})}{q_{\text{гр}}}. \quad (16)$$

Дополнительное удельное сопротивление движению поезда от уклона i в формуле (4) при анализе энергозатрат на уровне структурного подразделения обычно принимают равным нулю.

Входящие в уравнение (4) значения Q и $V_{\text{тех}}$ определяются по данным статистической отчетности о выполнении перевозочного процесса за базовый период.

Расчет коэффициентов влияния на уровне структурного подразделения осуществляется на основе параметров осредненного

локомотива, которые определяются путем осреднения рассматриваемых показателей по относительному объему перевозочной работы, выполненной локомотивами каждой серии, в общем объеме работы в грузовом движении [2]. Используемые в уравнении (4) параметры осредненного локомотива P , η , $N_{\text{кн}}$ и K_{b_x} рассчитываются по общей формуле

$$Z_{\text{оср}} = \sum_i Z_i \cdot M_{li}, \quad (17)$$

где Z_i — значение соответствующего параметра для локомотивов i -й серии;

M_{li} — доля работы локомотивов i -й серии в общей работе в грузовом движении.

Согласно [2] коэффициент использования мощности вспомогательных потребителей локомотива на холостом ходу K_x находится в диапазоне от 0,5 до 1,0, однако в нормативных документах и литературных источниках указания по определению конкретных значений этого коэффициента отсутствуют. В связи с этим при анализе расхода ТЭР на уровне структурного подразделения предлагается в формуле (4) вместо коэффициента K_x применять коэффициент эффективности использования рабочего парка локомотивов $K_p^{\text{эф}}$, который представляет собой отношение бюджета времени локомотивов рабочего парка за вычетом времени стоянок на промежуточных станциях и станциях оборота за анализируемый период времени к бюджету времени локомотивов рабочего парка за тот же период [4]. С 2014 г. этот показатель включен в структуру статистической отчетности ОАО «РЖД».

Коэффициент технического состояния локомотива $K_{\text{тс}}$ представляет собой отношение фактического и паспортного часовых расходов энергоносителя в режиме номинальной мощности [2], однако при существующей системе отчетности выполнить объективный и достоверный расчет этого коэффициента невозможно. По этой причине коэффициент $K_{\text{тс}}$ на электрической тяге предлагается принимать равным единице, а на дизельной тяге определять на основе данных систем регистрации параметров работы тепловозов в соответствии с «Временной методикой оценки теплотехнического (технического) состояния локомотивов, влияющего на их энергоэффективность», утвержденной ОАО «РЖД» 31.03.14.

Рекомендации по расчету коэффициента влияния участковой скорости $k_{\text{уч}}$ на изменение УРЭ в [2] не приведены. Целесообразно для определения этого коэффициента применить тот же подход, что и для других показателей, но поскольку $k_{\text{уч}}$ в явном виде в уравнении (4) отсутствует, то при вычислении частного дифференциала удельного расхода ТЭР по $k_{\text{уч}}$ необходимо использовать формулу взаимосвязи между технической $V_{\text{тех}}$ и участковой скоростью $V_{\text{уч}}$

$$V_{\text{тех}} = \frac{V_{\text{уч}}}{k_{\text{уч}}}. \quad (18)$$

Выполнив дифференцирование уравнения (4) по каждому анализируемому фактору с учетом изложенных выше предложений и подставив результирующие выражения в соответствующие

формулы (2) или (3), получим формулы для определения величины относительного изменения удельного расхода ТЭР (в процентах) в грузовом движении за счет влияния изменения качественных показателей использования локомотивов: средней массы поезда на 1 %

$$\beta_Q = -\frac{I_T}{b \cdot Q \cdot \eta} \cdot \left(\frac{K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x} \cdot N_{\text{кн}}}{V_{\text{тех}}} + \frac{K_{\text{тс}} - K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x}}{367,2} \cdot P \cdot w_o' \right); \quad (19)$$

средней нагрузки на ось грузового вагона на 1 %

$$\beta_q = -\frac{I_T \cdot (K_{\text{тс}} - K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x})}{b \cdot \eta \cdot 367,2} \times (w_o'' - 0,7 - 0,34424 \cdot M_{\text{п}} + 0,00208 \cdot M_{\text{бп}}); \quad (20)$$

средней технической скорости движения на 1 км/ч

$$\beta_{V_{\text{тех.гр}}} = \frac{I_T}{b \cdot Q \cdot \eta} \cdot \left(\frac{(K_{\text{тс}} - K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x})}{367,2} \cdot (P \cdot A_{\text{л}} + Q \cdot B_{\text{гр}} + 2 \cdot V_{\text{тех}} \cdot (P \cdot B_{\text{л}} + Q \cdot C_{\text{гр}})) - \frac{K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x} \cdot N_{\text{кн}}}{V_{\text{тех}}^2} \right) \cdot 100; \quad (21)$$

коэффициента участковой скорости на 1 %

$$\beta_{k_{\text{уч}}} = \frac{100 \cdot I_T}{b \cdot Q \cdot k_{\text{уч}} \cdot \eta} \cdot \left(\frac{K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x} \cdot N_{\text{кн}}}{V_{\text{тех}}} - \frac{(K_{\text{тс}} - K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x})}{367,2} \times (V_{\text{тех}} \cdot (P \cdot A_{\text{л}} + Q \cdot B_{\text{гр}}) + 2 \cdot V_{\text{тех}}^2 \cdot (P \cdot B_{\text{л}} + Q \cdot C_{\text{гр}})) \right) \quad (22)$$

доли порожнего пробега грузовых вагонов на 1 %

$$\beta_{\alpha_{\text{п}}} = \frac{I_T \cdot (K_{\text{тс}} - K_p^{\text{эф}} \cdot K_{b_x}) (S_1 + S_2 \cdot V_{\text{тех}} + S_3 \cdot V_{\text{тех}}^2)}{b \cdot \eta \cdot 367,2} \times (1 - M_{\text{п}}), \quad (23)$$

где S_1, S_2, S_3 — вспомогательные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$S_1 = 0,3 - \frac{3}{q_{\text{гр}}}; \quad (24)$$

$$S_2 = 0,002 \cdot (22 - M_{\text{бп}}) - \frac{0,1 \cdot (1 - 0,1 \cdot M_{\text{бп}})}{q_{\text{гр}}}; \quad (25)$$

$$S_3 = 0,00008 \cdot (3 - M_{\text{бп}}) - \frac{0,0025 \cdot (1 - 0,2 \cdot M_{\text{бп}})}{q_{\text{гр}}}. \quad (26)$$

Представленные выражения для расчета коэффициентов влияния изменения показателей использования локомотивов

на изменение УРЭ, в том числе уточненные относительно [2] формулы (20), (23) и новая формула (22), включены в состав разработанной в Омском государственном университете путей сообщения «Методики анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов» [5]. Эта методика используется для анализа изменения энергозатрат на тягу поездов на различных уров-

нях организационной структуры ОАО «РЖД» — от эксплуатационного локомотивного депо до сети железных дорог в целом. Ее внедрение обеспечило повышение эффективности анализа энергоемкости перевозочного процесса, служащего основой объективного планирования и рационального использования энергоресурсов на тягу поездов.

Литература

1. Сидорова Е. А., Давыдов А. И. Анализ динамики изменения показателей энергопотребления на тягу поездов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2009 : матер. Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Одесса, 21–28 декабря 2009 г. Одесса, 2009. Т. 1. С. 24–27.
2. Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов № ЦТД-26 / утв. МПС России 20.06.97.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 287 с.
4. ГОСТ Р 56046–2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2015. 24 с.
5. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.14 № 512.

References

1. Sidorova E. A., Davydov A. I. Analiz dinamiki izmeneniya pokazateley energopotrebleniya na tyagu poezdov [Analysis of energy consumption dynamics in the context of traction] // Sovremennye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii '2009 : mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., Odessa, 21–28 dekabrya 2009 g. Odessa, 2009. T. 1. S. 24–27.
2. Metodika analiza rezultatov raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov na tyagu poezdov № TsTD-26 [A method for analysis of fuel and energy consumption for CTD-26 train traction] / utv. MPS Rossii 20.06.97.
3. Pravila tyagovykh raschyotov dlya poezdnoy raboty [Traction calculation rules for train operation]. M. : Transport, 1985. 287 s.
4. GOST R 56046–2014. Pokazateli ispolzovaniya lokomotivov. Terminy i opredeleniya [Locomotive utilization rates. Terms and definitions]. M. : Standartinform, 2015. 24 s.
5. Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poezdov [A method for analysis and forecasting of energy resources consumption for train traction] / utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» ot 26.12.14 № 512.

УДК 629.423.32:621.3.066.3:621.3.066.6

Дмитрий Валерьевич Муравьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОНТАКТОРАХ ТИПА МК ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Dmitriy Valeryevich Muravyov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering and Rolling Stock Repair, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk

Analysis of power losses in magnetic contactors of MK-type DC and AC locomotives

Аннотация

В статье описана методика оценки потерь мощности в электромагнитных контакторах электровозов старых и новых серий, эксплуатируемых на железных дорогах России. На основании разработанной методики проведен анализ, который позволил выявить зависимости потерь мощности и коэффициента полезного действия электромагнитных контакторов от силы нажатия контактов, контролируемой при ремонте и определяющей техническое состояние контакторов в эксплуатации. Кроме того, определены доли потерь мощности в контакторах от общей мощности одной секции электровоза, которые характеризуют снижение коэффициента полезного действия всего локомотива.

Ключевые слова: номинальный ток, контакт, мощность, потери, электровоз, сила нажатия, коэффициент полезного действия, контактное сопротивление.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52

Summary

This article describes a method to estimate power losses in electromagnetic contactors of locomotives of old and new series operated by JSC Russian Railways. On the basis of the developed method, an analysis has been performed which revealed the dependence of the loss of power and coefficient of efficiency of electromagnetic contactors on contacts press force, which is controlled during repair and determines technical condition of contactors in operation. In addition, the share of power losses in contactors from the total power of a single locomotive section has been determined to characterize the decline in efficiency of the entire locomotive.

Keywords: rated current, contact, power losses, electric locomotive, pressing force, coefficient of efficiency, contact resistance.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52

Эксплуатация современных электровозов сопровождается внедрением ресурсосберегающих технологий и конструктивных решений, направленных на экономию электрической энергии, получаемой из контактной сети, и на повышение коэффициента полезного действия (КПД) электрического оборудования и всего электровоза в целом. Исходя из этого в исследовании автором поставлена задача оценить КПД электрических аппаратов электровозов на основе анализа потерь их мощности.

Анализ потерь мощности выполнялся для электромагнитных контакторов электровозов постоянного и переменного тока, питающих вспомогательные электрические цепи при замыкании контактов. Цель анализа заключалась в выявлении зависимости КПД электромагнитных контакторов от значений параметров, определяющих их техническое состояние в эксплуатации, а также от максимальной величины потерь мощности на контактах и доли потерь мощности в контакторах от общей мощности электровозов.

Известно, что для надежной работы электромагнитных контакторов в эксплуатации необходимо контролировать разрыв и провал, а также начальное и конечное нажатие силовых контактов [1].

Разрыв и провал силовых контактов, а также сила нажатия на контактах определяются конструкцией контактного узла, степенью износа контактов, величиной растяжения-сжатия или изменением характеристик контактных пружин в эксплуатации и конструктивными параметрами стягивающих катушек электромагнитов. Сила нажатия силовых контактов уменьшается вследствие изнашивания медных накладок контактов в процессе эксплуатации при сохранении требуемой величины электромагнитной силы, включающей катушки, или при уменьшении электромагнитной силы, передаваемой на контакты через систему рычагов от стягивающей катушки электромагнита. При этом не изменяется величина подвижного контакта, но соответственно изменяется сила нажатия на контактах [2].

Согласно анализу априорной информации известно, что сила нажатия силовых контактов Q_n влияет на сопротивление в цепи контактов $R_{кв}$, которое, в свою очередь, влияет на вели-

чину мощности $P_{\text{расч}}$ рассеиваемой на контактах при прохождении по вспомогательной цепи номинального тока I_H .

Контактное сопротивление R_k при прохождении по цепи контактов электрического тока определялось по формуле [3]

$$R_k = \frac{k_H}{Q_H^m}, \quad (1)$$

где k_H — коэффициент, зависящий от материала и конструкции контактов, для неокисленных медных контактов с металлокерамическими накладками из композиции «серебро — окись кадмия» $k_H = 0,97$;

m — показатель степени, зависящий от формы контактов, $m = 0,75$.

Величина рассеиваемой на контактах мощности (потери мощности) рассчитывалась по формуле

$$P_{\text{расч}} = I_H^2 \cdot R_k. \quad (2)$$

Таким образом, снижение силы нажатия контактов приводит к увеличению потерь электроэнергии, получаемой из контактной сети и проходящей через электромагнитные контакторы в вспомогательным цепям электровоза, что, в свою очередь, естественно, снижает КПД контакторов. В результате расчетов были определены потери (рассеивание) мощности на контактах $P_{\text{расч}}$ для диапазона допустимых значений силы нажатия контактов при выпуске контакторов из ремонта. Зависимости, представленные на рис. 1, получены из условия, что с увеличением силы нажатия контактов уменьшается контактное сопротивление и, как следствие, снижаются общие потери мощности в электромагнитных контакторах.

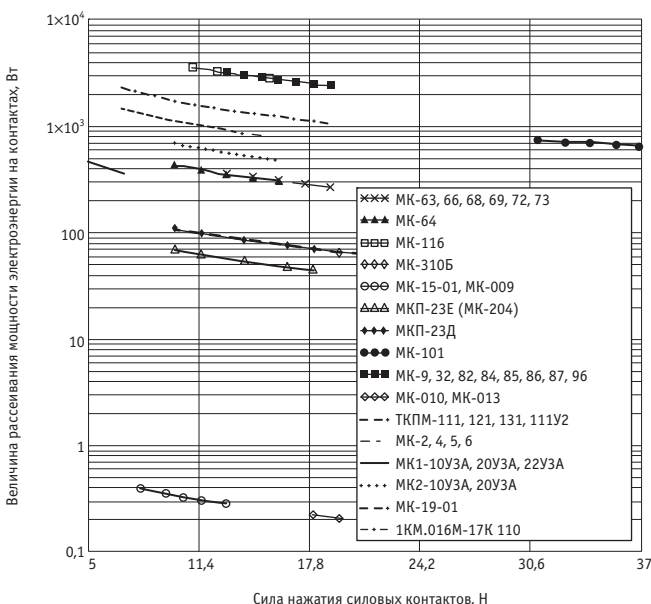


Рис. 1. Зависимости величины рассеивания мощности на контактах электромагнитных контакторов от силы нажатия контактов

Потери электроэнергии при коммутации силовых контактов электромагнитных контакторов влияют на КПД контакторов и всего электровоза в целом. Данный факт обусловил расчет значений КПД рассматриваемых типов контакторов в зависимости от изменения силы нажатия силовых контактов. Снижение КПД электромагнитных контакторов, используемых в электровозах, оценивалось при уменьшении конечного нажатия силовых контактов от максимального конструктивно допустимого значения до минимально допустимого. В результате расчетов были определены потери (рассеивание) мощности на контактах для рассматриваемого диапазона значений силы нажатия контактов. При этом за показатель КПД контакторов в 100 % принята величина рассеивания мощности при конструктивном максимально допустимом нажатии силовых контактов для каждого типа контактора, а при уменьшении нажатия от этого значения определялись потери мощности и соответственно снижение КПД вплоть до минимально допустимого нажатия.

Величина КПД электромагнитных контакторов типа МК рассчитывалась для конкретного значения конечного нажатия силовых контактов:

$$\eta_k = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{расч}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $P_{\text{опт}}$ — оптимальное рассеивание мощности на контактах при конструктивном максимально допустимом нажатии силовых контактов, Вт;

$P_{\text{расч}}$ — расчетное значение рассеивания мощности при определенной величине нажатия силовых контактов, Вт.

Разработанная методика оценки КПД контакторов дала возможность установить зависимости его значений от силы нажатия контактов (рис. 2).

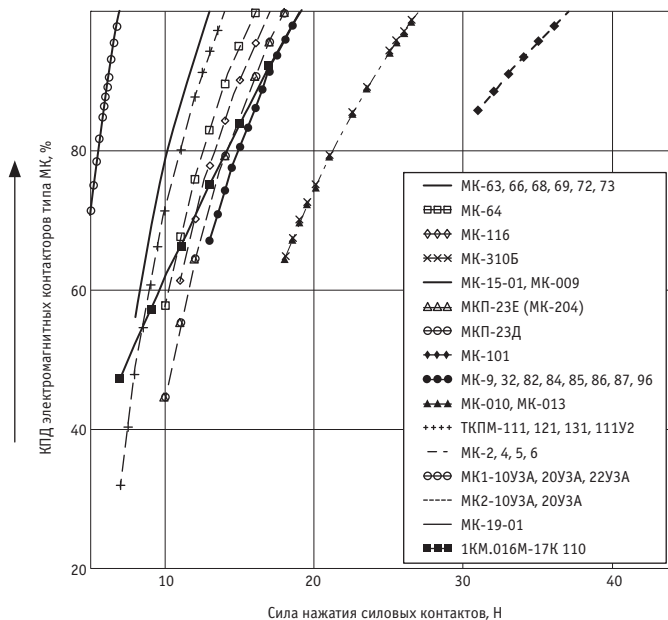


Рис. 2. Зависимости КПД электромагнитных контакторов от силы нажатия контактов

Расчет КПД позволяет спрогнозировать эффективность работы электромагнитных контакторов в эксплуатации с учетом величины нажатия силовых контактов, измеренной при контрольных испытаниях. Потери электрической мощности и снижение КПД контакторов при протекании электрического тока могут рассчитываться как для всего локомотива, так и для любой отдельной секции с учетом типов и количества установленных электромагнитных контакторов.

Далее проводились расчеты величин рассеивания мощности на контактах при отклонении силы нажатия на 1–3 Н от эталонного значения для различных типов контакторов, соответствующего максимально допустимой конструктивной силе нажатия контактов, и определялись отклонения этих величин, характеризующие снижение КПД электромагнитных контакторов в результате увеличения потерь мощности во вспомогательных цепях электровоза. Зависимости КПД от силы нажатия контактов для всех типов рассматриваемых контакторов представлены на графиках (см. рис. 2).

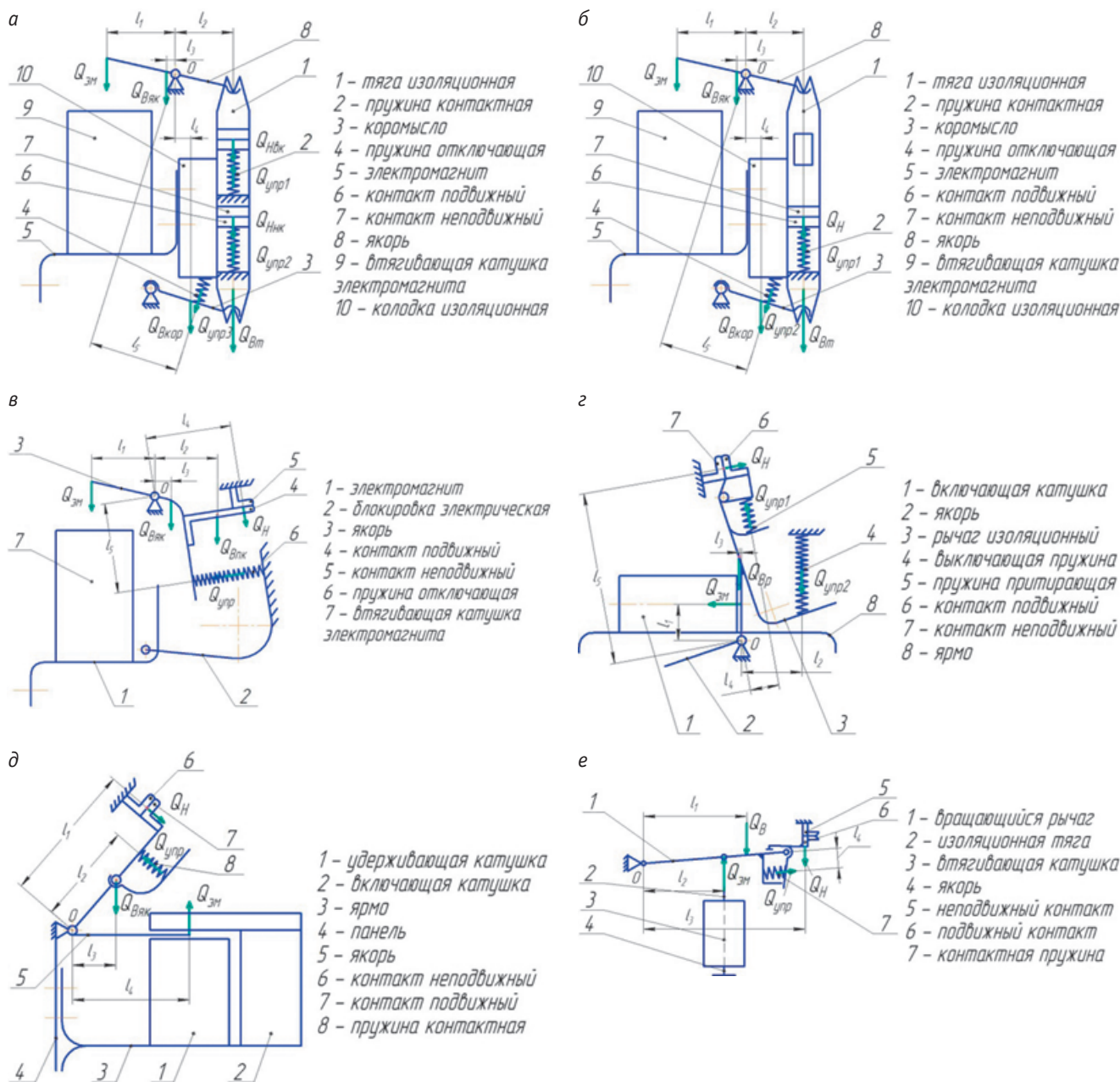


Рис. 3. Расчетные силовые схемы электромагнитных контакторов во включенном состоянии:

а — МК-63 (МК-66, МК-68, МК-116); б — МК-69 (МК-72, МК-73);

в — МК-82, МК-84, МК-85, МК-86 (МК-96); г — МК-310Б (МК-15-01); д — МКП-23 (МК-204), МКП-23Д, МКП-23Е; е — МК-101

Для того чтобы оценить влияние электромагнитной силы $Q_{эм}$ действующей на якорь контактора при включении втягивающей катушки электромагнита, и сил упругости $Q_{упр}$ контактной и отключающей пружин на силу нажатия контактов $Q_{н\prime}$ были составлены расчетные силовые схемы электромагнитных контакторов рассматриваемых типов, представленные на рис. 3 [4, 5].

Электромагнитные контакторы некоторых типов аналогичны по конструкции, поэтому расчетные силовые схемы составлены для групп контакторов, схожих по конструкции и представленных на рис. 3. Несмотря на конструктивные различия контакторов, принцип их действия в целом идентичен. Включение контактора осуществляется при подаче напряжения на втягивающую катушку электромагнита, в результате чего возникает электромагнитная сила, которая притягивает якорь к сердечнику катушки и поворачивает его вокруг шарнирной опоры, сообщая поступательное движение тяге или рычагу. При этом силовые и блокировочные контакты замыкаются или размыкаются. Выключение контакторов МК-63 (МК-68, МК-116), МК-69 (МК-73), МК-84–86 (МК-96), МК-310Б (МК-15-01), МК-101 осуществляется отключающими пружинами после снятия напряжения с включающих катушек, а контактора МКП-23 (МК-204) — за счет срабатывания удерживающей катушки 1, вращающей якорь 5 с подвижным контактом 7 в обратную сторону (см. рис. 3д). При размыкании силовой цепи на контактах возникает электрическая дуга, которая гасится за счет интенсивного нарастания сопротивления в дугowych промежутках. Помимо действия электромагнитной силы надежное фиксирование контактов осуществляется за счет действия сил упругости контактных пружин [6].

Силовые схемы включенных контакторов при условии равновесия системы позволили составить уравнения моментов сил, действующих на элементы конструкции контактора относительно точки O , для того чтобы вывести зависимости силы нажатия контактов от сил, действующих на рассматриваемую систему [7, 8].

Для контакторов типа МК-63 (МК-66, МК-68, МК-116):

$$\sum M_{O_1} = 0,$$

$$\begin{aligned} Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{кор}} \cdot l_4 - Q_{упр_3} \cdot l_5 + l_2 \times \\ \times (Q_{упр_1} + Q_{упр_2} - Q_{B_1}) - Q_{H_{нк}} \cdot l_2 - Q_{H_{нк}} \cdot l_2 = 0, \\ Q_{H_{нк}} + Q_{H_{нк}} = \frac{1}{l_2} [Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{кор}} \cdot l_4 - \\ - Q_{упр_3} \cdot l_5 + l_2 \cdot (Q_{упр_1} + Q_{упр_2} - Q_{B_1})], \end{aligned} \quad (4)$$

где $Q_{H_{нк}}$ и $Q_{H_{нк}}$ — сила нажатия верхнего и нижнего контакта соответственно при включении контактора, Н;

$Q_{эм}$ — электромагнитная сила, действующая на якорь при включении втягивающей катушки электромагнита, Н;

$Q_{упр_1}$ и $Q_{упр_2}$ — сила упругости контактной пружины, осуществляющей поджим верхнего и нижнего контакта соответственно при включении контактора, Н;

$Q_{упр_3}$ — сила упругости отключающей пружины, осуществляющей размыкание контактов при снятии напряжения со втягивающей катушки электромагнита, Н;

$Q_{B_{як}}$, Q_{B_1} и $Q_{B_{кор}}$ — вес якоря, изоляционной тяги и коромысла соответственно, приложенный в центре тяжести подвижной системы, Н;

l_1 — длина плеча приложения электромагнитной силы $Q_{эм}$ относительно точки O , мм;

l_2 — длина плеча приложения сил упругости контактных пружин $Q_{упр_1}$ и $Q_{упр_2}$, веса изоляционной тяги Q_{B_1} , сил нажатия верхнего и нижнего контактов $Q_{H_{нк}}$ и $Q_{H_{нк}}$ относительно точки O , мм;

l_3 — длина плеча приложения веса подвижных частей якоря $Q_{B_{як}}$ относительно точки O , мм;

l_4 — длина плеча приложения веса подвижных частей коромысла $Q_{B_{кор}}$ относительно точки O , мм;

l_5 — длина плеча приложения силы упругости $Q_{упр_3}$ отключающей пружины, мм [9, 10].

Для контакторов типа МК-69 (МК-72, МК-73):

$$\sum M_{O_2} = 0,$$

$$\begin{aligned} Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{кор}} \cdot l_4 - Q_{упр_2} \cdot l_5 + \\ + Q_{упр_1} \cdot l_2 - Q_{H_{нк}} \cdot l_2 - Q_{B_1} \cdot l_2 = 0, \\ Q_{H_{нк}} = \frac{1}{l_2} (Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{кор}} \cdot l_4 - \\ - Q_{упр_2} \cdot l_5 + Q_{упр_1} \cdot l_2 - Q_{B_1} \cdot l_2), \end{aligned} \quad (5)$$

где $Q_{H_{нк}}$ — сила нажатия силового контакта при включении контактора, Н;

$Q_{упр_1}$ — сила упругости контактной пружины, осуществляющей поджим силового контакта при включении контактора, Н;

$Q_{упр_2}$ — сила упругости отключающей пружины, осуществляющей размыкание контактов при снятии напряжения со втягивающей катушки электромагнита, Н;

l_2 — длина плеча приложения силы упругости контактной пружины $Q_{упр_1}$, веса изоляционной тяги Q_{B_1} и силы нажатия силового контакта $Q_{H_{нк}}$ относительно точки O , мм;

l_3 — длина плеча приложения силы упругости $Q_{упр_2}$ отключающей пружины, мм.

Для контакторов типа МК-82, МК-84, МК-85, МК-86, МК-87 (МК-96):

$$\sum M_{O_3} = 0,$$

$$\begin{aligned} Q_{эм} \cdot l_1 - Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{нк}} \cdot l_2 - Q_{упр} \cdot l_5 - Q_{H_{нк}} \cdot l_4 = 0, \\ Q_{H_{нк}} = \frac{1}{l_4} (Q_{эм} \cdot l_1 - Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_{B_{нк}} \cdot l_2 - Q_{упр} \cdot l_5), \end{aligned} \quad (6)$$

где $Q_{упр}$ — сила упругости отключающей пружины, осуществляющей размыкание контактов при снятии напряжения со втягивающей катушки электромагнита, Н;

$Q_{B_{нк}}$ — вес подвижного контакта, приложенный в центре тяжести подвижной системы, Н;

l_2 — длина плеча приложения веса подвижного контакта $Q_{B_{нк}}$ относительно точки O , мм;

l_4 — длина плеча приложения силы нажатия контактов Q_H относительно точки O , мм;

l_5 — длина плеча приложения силы упругости $Q_{упр}$ отключающей пружины, мм.

Для контакторов типа МК-310Б (МК-15-01):

$$\sum M_{0_4} = 0,$$

$$Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{упр_1} \cdot l_4 + Q_{B_p} \cdot l_3 - Q_{упр_2} \cdot l_2 - Q_H \cdot l_5 = 0,$$

$$Q_H = \frac{1}{l_5} (Q_{эм} \cdot l_1 + Q_{упр_1} \cdot l_4 + Q_{B_p} \cdot l_3 - Q_{упр_2} \cdot l_2), \quad (7)$$

где $Q_{упр_1}$ — сила упругости притирающей пружины, осуществляющей поджим силового контакта при включении контактора, Н;

$Q_{упр_2}$ — сила упругости выключающей пружины, осуществляющей размыкание контактов при снятии напряжения со включающей катушки электромагнита, Н;

Q_{B_p} — вес изоляционного рычага, приложенный в центре тяжести подвижной системы, Н;

l_2 — длина плеча приложения силы упругости выключающей пружины $Q_{упр_2}$ относительно точки O , мм;

l_3 — длина плеча приложения веса подвижных частей изоляционного рычага Q_{B_p} относительно точки O , мм;

l_4 — длина плеча приложения силы упругости притирающей пружины $Q_{упр_1}$ относительно точки O , мм;

l_5 — длина плеча приложения силы нажатия контактов Q_H относительно точки O , мм.

Для контакторов типа МКП-23 (МК-204), МКП-23Д, МКП-23Е:

$$\sum M_{0_5} = 0,$$

$$Q_{эм} \cdot l_4 + Q_{упр} \cdot l_2 - Q_{B_{як}} \cdot l_3 - Q_H \cdot l_1 = 0,$$

$$Q_H = \frac{1}{l_1} (Q_{эм} \cdot l_4 + Q_{упр} \cdot l_2 - Q_{B_{як}} \cdot l_3), \quad (8)$$

где $Q_{упр}$ — сила упругости контактной пружины, осуществляющей поджим силового контакта при включении контактора, Н;

l_1 — длина плеча приложения силы нажатия контактов Q_H относительно точки O , мм;

l_2 — длина плеча приложения силы упругости контактной пружины $Q_{упр}$ относительно точки O , мм;

l_3 — длина плеча приложения веса подвижных частей якоря $Q_{B_{як}}$ относительно точки O , мм;

l_4 — длина плеча приложения электромагнитной силы $Q_{эм}$ относительно точки O , мм.

Для контакторов типа МК-101:

$$\sum M_{0_6} = 0,$$

$$Q_{эм} \cdot l_2 + Q_{упр} \cdot l_4 - Q_B \cdot l_1 - Q_H \cdot l_3 = 0,$$

$$Q_H = \frac{1}{l_3} (Q_{эм} \cdot l_2 + Q_{упр} \cdot l_4 - Q_B \cdot l_1), \quad (9)$$

где Q_B — вес подвижных частей вращающегося рычага, приложенный в центре тяжести подвижной системы, Н;

l_1 — длина плеча приложения веса подвижных частей вращающегося рычага Q_B относительно точки O , мм;

l_2 — длина плеча приложения электромагнитной силы $Q_{эм}$ относительно точки O , мм;

l_3 — длина плеча приложения силы нажатия контактов Q_H относительно точки O , мм;

l_4 — длина плеча приложения силы упругости $Q_{упр}$ контактной пружины относительно точки O , мм.

При этом электромагнитная сила, с которой якорь притягивается к сердечнику втягивающей катушки электромагнита при подаче на нее напряжения, определялась по формуле

$$Q_{эм} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0}, \quad (10)$$

где B — магнитная индукция втягивающей катушки индуктивности электромагнита, Тл;

S — площадь притягивающей поверхности полюса (катушки электромагнита), м²;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м.

Магнитная индукция втягивающей катушки определялась как [5]

$$B = \frac{I \cdot w \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{L}, \quad (11)$$

где I — сила номинального тока, протекающего через катушку при включении контактора, А;

w — число витков втягивающей катушки электромагнита, шт.;

μ_r — магнитная проницаемость материала сердечника, Гн/м;

L — длина катушки индуктивности электромагнита, м.

Сила упругости контактной пружины рассчитывалась по формуле

$$Q_{упр} = k \Delta L, \quad (12)$$

где k — коэффициент жесткости контактной пружины, Н/м;

ΔL — величина деформации растяжения (сжатия) пружины, м.

Коэффициент жесткости контактной пружины рассчитывался по формуле

$$k = \frac{G \cdot d_d^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n}, \quad (13)$$

где G — модуль сдвига материала контактной пружины, ГПа;

d_d — диаметр проволоки контактной пружины, мм;

d_F — диаметр намотки контактной пружины, измеряемый от оси проволоки, мм;

n — число витков пружины.

Таким образом, исходя из проведенного анализа сделаны следующие выводы о влиянии состояния деталей и узлов электромагнитных контакторов на потери мощности и снижение КПД контакторов при коммутации силовых контактов.

1. Сила нажатия контактов обратно пропорционально влияет на величину потерь электрической энергии, потребляемой из контактной сети, что, в свою очередь, при уменьшении силы нажатия понижает КПД контакторов. Сила нажатия на контактах определяется конструктивным устройством контакторов, степенью износа их деталей, характеристиками контактных, выключающих и притирающих пружин, а также втягивающих катушек электромагнитов.

2. Анализ силовых схем контакторов позволил установить, что на силу нажатия контактов Q_H влияют электромагнитная сила втягивающей катушки электромагнита $Q_{эм}$ и сила упругости контактной пружины $Q_{упр}$ при неизменном весе подвижных частей контактора Q_B (якоря, коромысла, изоляционной тяги, подвижного контакта, вращающегося и изоляционного рычагов). В процессе работы контакторов при уменьшении электромагнитной силы, действующей на якорь при включении втягивающей катушки электромагнита, снижается сила нажатия контактов и соответственно КПД контактора. Согласно выражению (10) уменьшение электромагнитной силы возможно в случае снижения магнитной индукции включающей катушки электромагнита, которое может происходить в результате изменения геометрических параметров катушки, уменьшения магнитной проницаемости магнитопровода (сердечника) катушки или силы номинального тока, проходящего через катушку при включении контактора. Установлены допустимые значения омического сопротивления катушек индуктивности, поэтому при его увеличении снижается сила тока, проходящего через катушку, и соответственно электромагнитная сила, определяющая силу нажатия контактов и величину КПД контакторов. Для контакторов МК-63, МК-64, МК-66, МК-68, МК-69, МК-72, МК-73 диапазон допустимых значений сопротивления катушки составляет 45,7–51,95 Ом, для контакторов МК-82, МК-84, МК-85, МК-86, МК-87, МК-96, МК-116 — 41,6–47,28 Ом.

3. При неизменной величине деформации растяжения или сжатия пружины ΔL величина силы упругости контактной пружины $Q_{упр}$, рассчитываемая по формуле (12), определяется жесткостью пружины k . Исходя из этого очевидно, что величина жесткости зависит от диаметра намотки пружины сжатия d_F (13): увеличение d_F в процессе сдавливания пружины при эксплуатации приводит к снижению коэффициента жесткости, в результате чего уменьшаются сила упругости пружины и сила нажатия контактов (4)–(9).

4. Разработанная методика позволила рассчитать общие потери мощности в контакторах электровозов по формуле (1), а также определить доли потерь мощности в контакторах от общей мощности одной секции локомотива (рис. 4).

5. Результаты расчетов, полученные на основе опытных данных (см. рис. 4), позволили установить, что наибольшие потери мощности в электромагнитных контакторах приходятся на односекционные модели грузовых и пассажирских электровозов, таких как ВЛ60, ВЛ60р, ВЛ60п, ВЛ60к, ВЛ60с, ВЛ60п/к, ЭП1, ЭП1П, ЭП1М, Э5К, а также на грузовые локомотивы большой мощности, такие как ВЛ80, ВЛ80к, ВЛ80р, ВЛ80с, ВЛ80т, ВЛ85. Это обусловлено большим количеством работающих электромагнитных контакторов, а также большими значениями номинального рабочего тока контакторов МК-63, МК-64, МК-66, МК-69, МК-83, МК-84, МК-87 и МК-96, используемых в электровозах ВЛ60, ВЛ60р, ВЛ60п, ВЛ60к, ВЛ60с, ВЛ60п/к, а также МК-63, МК-63-01, МК-63-02, МК-68, МК-69, МК-72, МК-8-01, МК-9, МК-32, МК-84, МК-45 и МК-82, используемых в электровозах ЭП1, ЭП1П, ЭП1М.

6. Наибольшее значение доли потерь мощности в электромагнитных контакторах от общей мощности одной секции локомотива для рассматриваемых серий электровозов не превышает 1%.

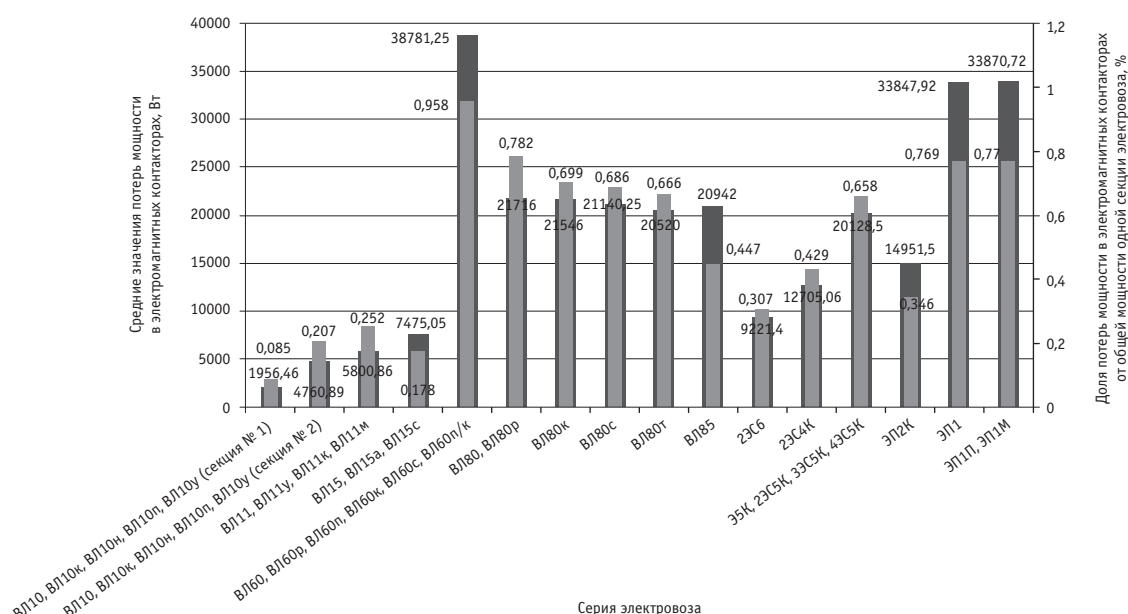


Рис. 4. Средние рассчитанные значения потерь мощности в электромагнитных контакторах, приходящиеся на одну секцию электровоза постоянного или переменного тока

Литература

1. Магистральные электрово­зы. Электрические машины и трансформаторное оборудование электро­возов / В. И. Бочаров, П. А. Золотарев, М. А. Козорезов и др. М. : Машиностроение, 1968. 444 с.
2. Дубровский З. М., Попов В. И., Тушканов Б. А. Грузовые электро­возы переменного тока : справ. М. : Транспорт, 1991. 471 с.
3. Баталов Н. М., Петров Б. П. Тяговые электрические аппараты. М. : Энергия, 1984.
4. Электро­воз ВЛ80р. Руководство по эксплуатации / Под ред. Б. А. Тушканова. М. : Транспорт, 1985. 541 с.
5. Бочаров В. И., Васьюк Н. М., Вольвич А. Г. Магистральные электро­возы: электрические аппараты; полупроводниковые преобразователи; системы управления. М. : Транспорт, 1994.
6. Электро­воз ВЛ10 и ВЛ10у. Руководство по эксплуатации / Под ред. О. А. Кикнадзе. М. : Транспорт, 1981. 519 с.
7. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрических железных дорог. М. : Транспорт, 1989.
8. Дубровский З. М., Лорман Л. М. Электро­возы ВЛ60к и ВЛ60п/к. Руководство по эксплуатации. М. : Транспорт, 1993.
9. Электро­воз пассажирский двухсекционный магистральный постоянного тока 2ЭС4К «Дончак» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации ИДМБ.661141.004РЭ (ЗТС.000.003 РЭ) / ОАО «ВЭЛНИИ». Новочеркасск, 2006.
10. Электро­воз грузовой магистральный переменного тока 2ЭС5К «Ермак» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации ИДМБ.661142.009 РЭ (ЗТС.001.012 РЭ) / ОАО «ВЭЛНИИ». Новочеркасск, 2006.

References

1. Magistralnye elektrovozy. Elektricheskie mashiny i transformatornoe oborudovanie elektrovozov [Mainline electric locomotives. Electric machinery and transformer equipment of locomotives] / V. I. Bocharov, P. A. Zolotarev, M. A. Kozorezov i dr. M. : Mashinostroenie, 1968. 444 s.
2. Dubrovskiy Z. M., Popov V. I., Tushkanov B. A. Gruzovye elektrovozy peremennogo toka : sprav. [Freight AC locomotives : a manual]. M. : Transport, 1991. 471 s.
3. Batalov N. M., Petrov B. P. Tyagovye elektricheskie apparaty [Traction electric equipment]. M. : Energiya, 1984.
4. Elektrovoz VL80r. Rukovodstvo po ekspluatatsii [VL80r locomotive. Operating manual] / Pod red. B. A. Tushkanova. M. : Transport, 1985. 541 s.
5. Bocharov V. I., Vasko N. M., Volvich A. G. Magistralnye elektrovozy: elektricheskie apparaty; poluprovodnikovye preobrazovateli; sistemy upravleniya [Mainline electric locomotives: electrical machinery; semiconductor converters; control systems]. M. : Transport, 1994.
6. Elektrovoz VL10 i VL10u. Rukovodstvo po ekspluatatsii [VL10 and VL10u locomotives. Operating manual] / Pod red. O. A. Kiknadze. M. : Transport, 1981. 519 s.
7. Tikhmenev B. N., Trakhtman L. M. Podvizhnoy sostav elektricheskikh zheleznikh dorog [Rolling stock of electric railways]. M. : Transport, 1989.
8. Dubrovskiy Z. M., Lorman L. M. Elektrovozy VL60k i VL60p/k. Rukovodstvo po ekspluatatsii [VL60k and VL60p/k locomotives. Operating manual]. M. : Transport, 1993.
9. Elektrovoz passazhirskiy dvukhseksionniy magistralniy postoyannogo toka 2ES4K «Donchak» s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami : rukovodstvo po ekspluatatsii IDMB.661141.004RE (ZTS.000.003 RE) [Two-unit passenger mainline DC locomotive 2ES4K «Donchak» with collector traction motors : operating manual] / ОАО «ВЕЛНИИ». Novocherkassk, 2006.
10. Elektrovoz gruzovoy magistralniy peremennogo toka 2ES5K «Ermak» s kollektornymi tyagovymi elektrodvigatelyami : rukovodstvo po ekspluatatsii IDMB.661142.009 RE (ZTS.001.012 RE) [Mainline AC locomotive 2ES5K «Ermak» with current collector traction motors : operating manual] / ОАО «ВЕЛНИИ». Novocherkassk, 2006.

УДК 629.41

Петр Николаевич Рубежанский, кандидат экономических наук, советник компании «Русские технологии», Москва

МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Petr Nikolayevich Rubezhanskiy, PhD in Economics, Economic Problems Advisor, JSC Russian Technology, Moscow

A method for organization of integrated system of a locomotive repair facility

Аннотация

В статье предложена методология организации новой, оптимизированной, системы локомотиворемонтного производства. Ее реализация позволит холдингу ОАО «РЖД» повысить надежность эксплуатации локомотивов, снизить число отказов технических средств, уменьшить издержки на ремонт и обслуживание.

Ключевые слова: оптимизированная система ТОР, расчетная эффективность, ресурсные параметры основных узлов и агрегатов, средства диагностики, полигонные технологии.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-53-56

Summary

The paper proposes a methodology for the organization of a new optimized locomotive repair facility system. Its implementation will allow JSC Russian Railways to improve operational reliability of locomotives, reduce equipment failure rates and repair and maintenance costs.

Keywords: optimized TOR system, design efficiency, resource parameters of the main units and components, diagnostics facilities, polygon technologies.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-53-56

Создание оптимизированной системы ремонта на основе ключевых показателей строится на управлении техническим состоянием локомотивного парка, включая диагностирование и факторный анализ, рационализацию системы ТОР с учетом ресурсных параметров оборудования и максимального использования производственных мощностей ремонтных депо заводов.

Авторский взгляд на оптимизацию локомотиворемонтного производства в холдинге «РЖД» состоит в том, что она возможна на основе анализа многолетнего опыта системы планово-предупредительного ремонта в МПС, в которой по данным о пробегах локомотивов формируются потребные объемы ремонта и выявляются дефекты узлов и деталей в системе on-line АСУ ЦТР.

Основные направления и критерии оптимизированной системы ТОР состоят в следующем:

оптимизация мощностей ремонтных локомотивных депо с учетом перехода на полигонные технологии эксплуатации, обеспечение полной загрузки наиболее современных депо крупными видами ремонта, перепрофилирование незагруженных депо;

интеграция локомотиворемонтного комплекса с информационными системами «РЖД» — ЕКАСУТР, АСОУП, ГИД УРАЛ и др., для чего создается информационная АСУ ЦТР и центр информационного сопровождения процесса эксплуатации локомотивного парка.

С момента образования Дирекции по ремонту тягового подвижного состава в ней разработаны целевые показатели и поставлена задача по созданию оптимизированной системы ремонта. Методологически модернизированная система управления ТОР осуществляется на основе экономического анализа производственных бизнес-процессов, оценки выполнения показателей эффективности работы локомотивного парка в новых условиях, экономического эффекта от внедрения новых интенсивных технологических процессов.

Дальнейшее совершенствование организации ТОР связано с реализацией комплексной программы (рис. 1), предусматривающей снижение неисправностей локомотивов в процессе эксплуатации и соответственно оптимизацию затрат на производство ТО и всех видов ремонта (табл. 1).

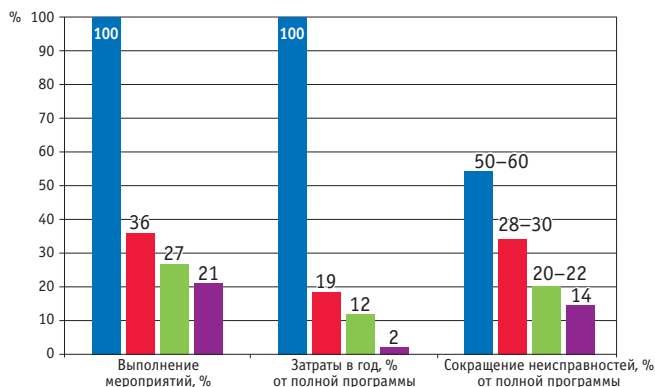


Рис. 1. Расчетные показатели затрат комплексной программы:

- — полная, 10,5 млрд руб.; ■ — сокращенная, 2 млрд руб.;
- — оптимизированная, 1,2 млрд руб.;
- — минимизированная, 0,187 млрд руб.

В соответствии со стратегией развития «РЖД» оптимизированная структура прежде всего должна предусматривать новую модель ремонтных циклов по сравнению с действующей системой: проведение ТО-2 через 96 ч вместо 72 ч. Обслуживание в объеме ТР-1, имеющее базовую величину пробега 25 тыс. км, смещается на пробег 40 тыс. км. Виды ремонта ТР-3 заменяются на ремонт ДР-1 и ДР-3, при котором оборудование, подлежащее ремонту с разборкой, демонтируется и заменяется на переходный комплект, отремонтированный в депо (см. табл. 1).

Необходимо отметить, что при переходе на оптимизированную структуру изменяется и структура затрат по видам ремонта (рис. 2). Заводской ремонт должен предполагать замену узлов с истекшим по ТУ сроком службы (обеспечивая при этом необходимую кратность ремонта основного оборудования и самого локомотива), а также выполнение дополнительных работ, направленных на повышение надежности [1].

Таблица 1

Расчет изменения бюджета затрат по видам ремонта

Виды ремонта		Удельный вес, %		Затраты, млрд руб.	
Существующая система	Оптимизированная	Существующая система	Оптимизированная	Существующая система	Оптимизированная
1. Техническое обслуживание	Техническое обслуживание	15,2	15,6	26,79	23,85
2. Текущие ремонты	Текущие ремонты	48,5	36,1	86,51	55,19
3. Средние ремонты		19,7	—	34,19	—
	Деповские ремонты (средние)	—	7,6	—	11,62
4. Капитальные ремонты	Капитальные ремонты	16,6	40,7	28,81	66,23
Итого		100,0	100,0	176,3	152,9

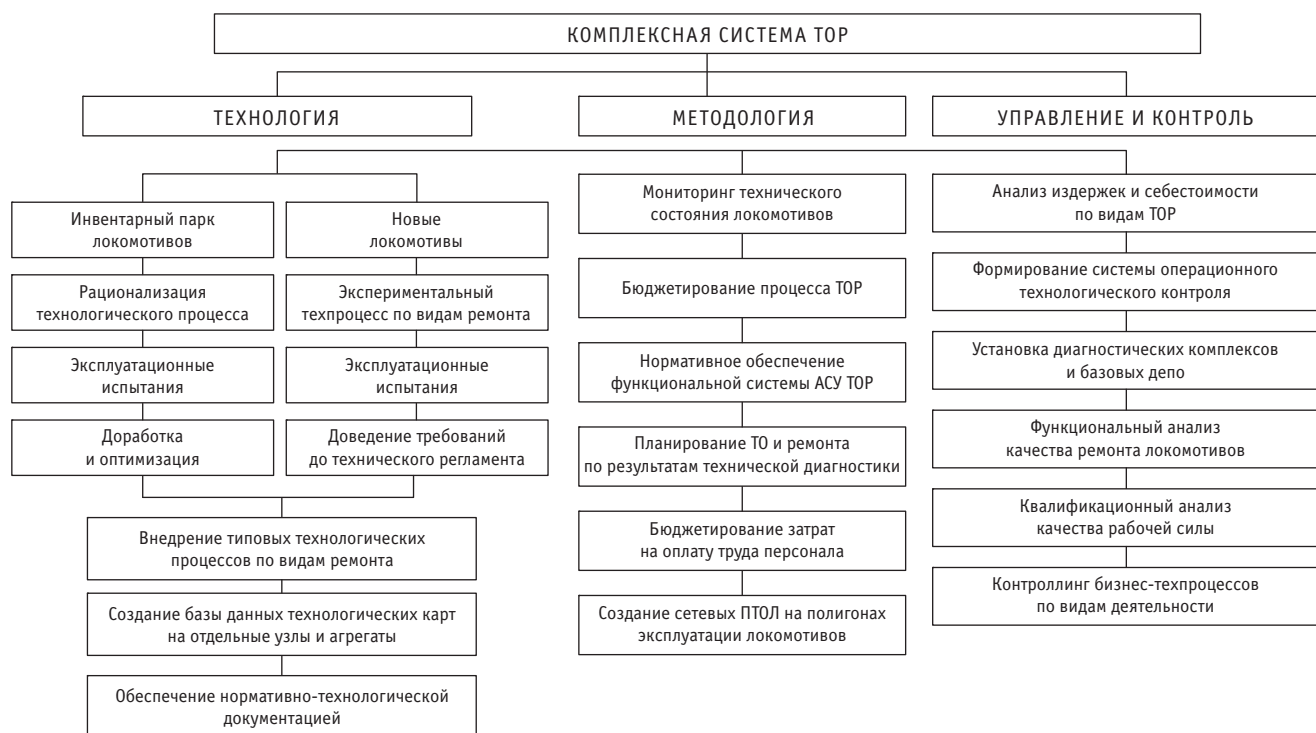


Рис. 2. Формализованная система локомотиворемонтного производства

Для сравнения эффективности внедрения планово-предупредительной системы СТОР УТС выполнен расчет экономии отремонтированного локомотива по его оставшемуся жизненному циклу для парка электровозов ВЛ80. Расчет производился на период 15-летней эксплуатации — приблизительно к «этапу эксплуатации» в жизненном цикле локомотива. Расчетное сокращение затрат на техническое содержание парка электровозов ВЛ80 за 15 лет эксплуатации при реализации модели СТОР УТС составило 20,6 млрд руб.

Краткий анализ двух технико-экономических моделей показывает: доля затрат на капитальный ремонт при оптимизированной системе ремонта возрастает до 40,7 % по сравнению с 16,6 % при существующей системе [2, 3]. Новая модель базируется на превалировании в структуре затрат доли заводских ремонтов, в то время как при существующей системе ремонта основную долю (48,5 %) занимают затраты на текущие ремонты (табл. 2). В целом без учета ТО структура затрат для депоовских ремонтов составляет 59,3 %, а заводских — 40,7 % (без учета неплановых ремонтов и ТО).

Таблица 2

Стоимостная оценка комплексной оптимизированной системы ремонтного производства

Виды ремонта	Стоимость 1 ремонта, тыс. руб.	Число ремонтов за 15 лет эксплуатации	Суммарная стоимость ремонтов за 15 лет, млн руб.
Заводской ремонт	20 232,0	3115	62 300,27
Депоовской ремонт-3	3338,3	1038	3464,8
Депоовской ремонт-2	5499,3	2077	11 422,12
Депоовской ремонт-1	3338	6231	20 799,1
Текущий ремонт	177,9	174 455	31 035,5
Техническое обслуживание	6,3	3 790 251	23 878,6

В то же время мировой опыт (в частности, китайских железных дорог) строго регламентирует правила ремонта локомотивов, особенно капитального ремонта (КР). Цикл между КР составляет 15 лет. За 1,5 года до наступления этого срока начинает разрабатываться проект капитального ремонта с учетом повышения эксплуатационных характеристик, соответствующих последним достижениям техники. С поступившего на КР локомотива демонтируется и утилизируется вся электроаппаратура, которая заменяется современными моделями нового изготовления. На выходе из капитального ремонта заказчик получает локомотив, отвечающий самым современным требованиям и оснащенный новейшим оборудованием. В эксплуатации же никаких вмешательств в конструкцию локомотива, никакого оснащения дополнительными устройствами не допускается.

В практике капитального ремонта в депо и на заводах холдинга «РЖД» обычно наблюдается обратная картина — новые узлы и агрегаты локомотивов устанавливаются при ре-

монте в депо, а при заводских ремонтах они демонтируются, электрическая схема и вспомогательное оборудование приводятся в соответствие с устаревшей нормативной документацией Ростехнадзора.

В результате дальнейшей оптимизации ремонт оборудования (ремонтных комплектов) для электровозов в объеме ДР-2 планируется выполнять на локомотиворемонтных заводах ОАО «Желдорремаш», а ДР-1 и ДР-3 — в 23 ремонтных локомотивных депо. При этом загрузка данных ремонтных локомотивных депо по производству ТР-3 электровозов возрастет до 83,9 %. Благодаря концентрации ремонтов ТР-3 и СР к 2020 г. загрузка локомотивных депо, выполняющих такие ремонты тепловозов, увеличится с 56,8 до 75,7 %. Для эффективной работы базовых депо необходимо предусмотреть программу их дооснащения высокопроизводительным современным оборудованием, средствами диагностики и малой механизации. Все эти меры обеспечат высокое качество ремонта локомотивов и одновременное снижение издержек.

Вышеуказанные мероприятия были осуществлены в рамках внедрения опытных моделей системы планово-предупредительного ремонта (ППР) с учетом ресурсных параметров оборудования. Полная реализация системы рассчитана на срок 15 лет [4] и содержит 5 основных этапов.

Заданные в «Белой книге» холдинга «РЖД» цели по развитию локомотиворемонтного комплекса и техническому содержанию локомотивов могут быть достигнуты на основе использования системного подхода к решению задач. Это прежде всего реализация разработанной методологии управления ремонтным производством и его оптимизации (рис. 3). За счет внедрения полного комплекса научных подходов по дальнейшему развитию локомотиворемонтного хозяйства компания «РЖД» должна получить экономический эффект более 20 млрд руб. в год при одновременном достижении необходимого уровня технической надежности локомотивного парка и полном обеспечении безопасности движения.

Проект плана мероприятий по внедрению оптимизированной системы ремонта локомотивов включает следующие этапы: описание проекта, анализ рынка перевозок и потребности в локомотивном парке, обоснование развития полигонных технологий, описание модели взаимодействия локомотивного комплекса с базами локомотиворемонтных заводов, создание перечня инновационных технологий ремонта локомотивов, создание модели технической эксплуатации при внедрении системы СТОР УТС, утверждение план-графика внедрения этапов проекта [5, 6].

Реализация предлагаемой методологии организации новой системы ремонта на основе реальных ресурсных параметров узлов и агрегатов локомотивов и оборудования ремонтных депо позволит компании ОАО «РЖД» в перспективе до 2017 г. получить выгоду в виде повышения надежности эксплуатации локомотивов на 1800 единиц, снизить на 40 % число отказов технических средств, уменьшить издержки на ремонт и обслуживание локомотивов на 10–15 % по сравнению с уровнем 2015 г.



Рис. 3. Этапы реализации программы оптимизации

Литература

1. Бубнова Г. В. Новые информационные технологии стратегического планирования работы железнодорожного транспорта // Экспресс-информация ЦНИИТЭИ. 2000. № 3. С. 18–32. ISSN 0236–3615.
2. Бубнова Г. В., Ковшова М. М. Условия эффективной работы ОАО «РЖД» на рынке транспортных услуг // РЖД-Партнер. 2001. № 12. С. 26–29.
3. Глазкова Т. И. Управление затратами и хозяйственной деятельностью заводов по ремонту подвижного состава. М. : ВИНТИ РАН, 2008. 246 с.
4. Макаров Г. Н. Теория экономических информационных систем : учеб. пособие. Смоленск : СГУ, 2008.
5. Давыдов А. В., Рубежанский П. Н. Методические подходы к измерению показателей системы управления перевозочным комплексом // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 19–22. ISSN 1815–9400.
6. Рубежанский П. Н. Надежность и эффективность системы управления перевозочным процессом // Экономика железных дорог. 2013. № 8. С. 81–87. ISSN 1727–6500.

References

1. Bubnova G. V. Noveye informatsionnye tekhnologii strategicheskogo planirovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta [New information technologies for strategic planning of rail transport operation] // Ekspress-informatsia TsNIITEI. 2000. № 3. S. 18–32. ISSN 0236–3615.
2. Bubnova G. V., Kovshova M. M. Usloviya effektivnoy raboty OAO «RZhD» na rynke transportnykh uslug [Conditions of effective operation of JSC Russian Railways in transport services market] // RZhD-Partnyor. 2001. № 12. S. 26–29.
3. Glazkova T. I. Upravlenie zatratami i khozyaystvennoy deyatelnostyu zavodov po remontu podvizhnogo sostava [Cost management and commercial operation of rolling stock repair facilities]. M. : VINITI RAN, 2008. 246 s.
4. Makarov G. N. Teoriya ekonomicheskikh informatsionnykh sistem : ucheb. posobie [Theory of economic information systems : a textbook]. Smolensk : SGU, 2008.
5. Davydov A. V., Rubezhansky P. N. Metodicheskie podkhody k izmereniyu pokazateley sistemy upravleniya perevozochnym kompleksom [Methodological approaches to indicators measurement of transportation complex control system] // Transport of the Urals. 2010. № 1 (24). S. 19–22. ISSN 1815–9400.
6. Rubezhanskiy P. N. Nadezhnost i effektivnost sistemy upravleniya perevozochnym protsessom [Reliability and efficiency of transportation management system] // Ekonomika zheleznykh dorog. 2013. № 8. S. 81–87. ISSN 1727–6500.

УДК 656.076.152

Дмитрий Иванович Хомич, ассистент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Вячеслав Сергеевич Тимченко, научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН), Санкт-Петербург

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКОМОТИВОВ В ХОЗЯЙСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Dmitriy Ivanovich Khomich, Assistant Lecturer, Department of Railway Stations and Junctions, Petersburg State Transport University (PSTU), Saint-Petersburg, Vyacheslav Sergeyevich Timchenko, Researcher, Laboratory of Development of Transport Systems and Technologies, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (IPT RAS), Saint-Petersburg

Algorithmization of locomotive distribution process in commercial traffic

Аннотация

Рассмотрена актуальная задача предоставления локомотивов для хозяйственных нужд с учетом роста перевозок на подходах к крупным транспортным узлам и портам. При ее решении использован метод алгоритмизации данных, ориентированных на технические характеристики локомотивов и участков их обращения. Задача рассмотрена в традиционной постановке с учетом действующих норм и правил. Показано, что эффективное распределение локомотивов в хозяйственном движении позволит снизить дефицит грузовых магистральных локомотивов и сократить из-за их отсутствия задержки поездов.

Ключевые слова: содержание инфраструктуры, транспортировка путевых машин, техническая характеристика локомотивов, алгоритмизация процесса перевозок, хозяйственный поезд, род службы локомотива.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-57-60

Summary

The actual problem of providing locomotives for economic needs taking into account the increase in traffic on the way to major transportation hubs and ports has been considered. Its solution is based on a method of algorithmization of data focused on specifications of locomotives and sections where they operate. The problem is considered in the traditional setting, taking into account the existing rules and regulations. It is shown that effective distribution of locomotives in commercial traffic will reduce the deficit of mainline freight locomotives and cut train delays because of the lack of locomotives.

Keywords: infrastructure maintenance, transportation of track machines, locomotive specifications, algorithmization of transportation process, commercial train, type of service of locomotive.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-57-60

Ремонтно-строительные работы — это неотъемлемая сторона деятельности железных дорог по обеспечению безопасности следования грузовых и пассажирских поездов с установленными графиком скоростями [1].

Для улучшения состояния пути, оптимизации технологических процессов, повышения производительности труда и снижения себестоимости работ осуществляется переход на механизированное текущее содержание пути за счет широкого применения средств механизации [2].

Путевые машины конструктивно делятся на две группы — самоходные и несамоходные, что в ряде случаев требует выделения отдельной тяговой единицы для их дальнейшей работы и транспортировки.

На сегодняшний день насчитывается более 200 серий локомотивов, эксплуатируемых в различных видах движения, а следовательно, имеющих различные тяговые и другие характеристики, что становится значимым критерием при выборе локомотива для работы с путевой техникой.

Дефицит локомотивного парка в условиях роста объемов грузоперевозок на железнодорожных участках, расположенных на подходах к крупным узлам и морским торговым портам, осложняет задачу распределения локомотивов при их выделении для работы в хозяйственном движении.

В статье рассмотрен алгоритм распределения локомотивов для формирования хозяйственных поездов, работы с путевыми машинами в «окно», транспортировки к местам проведения путевых работ и обратно.

Для определения потребного количества локомотивов и их распределения по мощности необходимо весь объем путевых работ разделить на:

- подготовительные (транспортировка материалов и техники к месту проведения работ);
- технологические (формирование хозяйственных поездов на станции);
- работу в «окно».

Рассмотрим подробно распределение локомотивов для обеспечения транспортировки материалов и путевой техники к месту проведения работ.

Существующая система управления локомотивным парком позволяет ориентировочно оценить потребное количество локомотивов, необходимых для организации и проведения путевых работ, на основе отчетных данных за предыдущие годы.

Предлагаемая модель, учитывая объемы и технологию проведения работ, дает возможность определить потребность в локомотивах с распределением их по типам и продолжительности занятости на каждом этапе.

Согласно технологическому процессу выполнения ремонтных работ составляется план завоза материалов и количества путевых машин или их комплексов к станции базирования ПМС во время «окна».

С учетом материалов и путевых машин, которые могут быть приписаны к различным организациям ПЧМ, ПМС, ВЧД и др., их транспортировка, как правило, осуществляется из разных мест. Исходя из этого расчет локомотивов производится по принципу «под один хозяйственный поезд — один локомотив».

Некоторые виды путевой техники работают в технологической цепочке и всегда транспортируются единым комплексом машин (например, Duomatic + ДСП + ПБ, СЧ или RM80 + состав засорителей), а другие могут следовать в составе поезда (ПРСМ, СМ-2), что позволяет снизить количество локомотивов, задействованных в транспортировке.

Для эффективного использования локомотивов, эксплуатируемых от станции формирования хозяйственного поезда до станции назначения, необходимо распределить их по мощности и производительности компрессора исходя из критической массы и количества осей в составе поезда [3].

Одно из условий выбора локомотива — дальность транспортировки материалов и путевой техники к месту проведения работ (род службы локомотива).

С целью эффективного использования парка локомотивов, задействованных в хозяйственном движении, разработано и введено в действие распоряжение ОАО «РЖД» от 02.07.15 № 1654р [4], однако в полной мере этот документ не обеспечивает учет ряда факторов, которые способны эффективно использовать тяговые ресурсы.

Один из важнейших этапов распределения локомотивного парка — расчет времени занятости локомотива непосредственно в период транспортировки, которое определяется выражением, полученным на основе анализа статистических данных транспортно-технологического процесса работы полигона Октябрьской железной дороги:

$$T = t_x + t_n + 0,052s_{km}, \quad (1)$$

где T — общее время занятости локомотива для транспортировки техники или материалов к месту проведения работ, ч;

t_x — время следования локомотива от депо до станции отправления поезда, ч;

t_n — время на подготовительные операции для отправления поезда (маневры на станции, опробование автотормозов), ч;

$0,052s_{km}$ — маршрутная скорость продвижения хозяйственных поездов, км/ч.

Как правило, при формировании заявки на транспортировку рассматривают 5 типов локомотивов (табл. 1).

Таблица 1

Критерии выбора типа локомотива

Критерий	Маневровый локомотив	Вывозной локомотив (2М62)	Пассажирский локомотив	Грузовой электровоз	Грузовой тепловоз
Дальность транспортировки, км					
До 150	Да	Да	Да	Да	Да
От 150 до 400	Нет	Да	Да	Да	Да
Свыше 400	Нет	Да	Да	Да	Да
Количество осей в поезде					
До 200	Да	Да	Да	Да	Да
Свыше 200	Нет	Да	Нет	Да	Да
Масса поезда, т					
До 500	Да	Да	Да	Да	Да
От 500 до 1000	Нет	Да	Да	Да	Да
Свыше 1000	Нет	Нет	Нет	Да	Да

Выбор между 4-м и 5-м типом определяется наличием или отсутствием электрификации участка.

Алгоритм позволяет рассчитать:
 количество хозяйственных поездов с учетом возможности формирования комплексов путевых машин;
 количество локомотивов по типам;
 длительность транспортировки локомотивом хозяйственного поезда;
 занятость локомотивов на транспортно-технологических операциях.

Количество хозяйственных поездов определяется по формуле

$$N_{\text{сост}} = 2 \cdot N_{\text{сост.мат}} + N_{\text{компл.п.м}} + N_{\text{п.м}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{сост}}$ — суммарное количество составов хозяйственных поездов;

$N_{\text{сост.мат}}$ — количество составов с материалами (для составов по доставке материалов используется коэффициент 2, обозначающий возврат порожних вагонов под погрузку);

$N_{\text{компл.п.м}}$ — количество комплексов путевых машин;
 $N_{\text{п.м}}$ — количество путевых машин.

Потребное количество локомотивов соответствует количеству составов:

$$N_{\text{лок}} = N_{\text{сост}}.$$

Алгоритм распределения локомотивов для транспортировки материалов и путевой техники к месту проведения работ F на модифицированном языке ЛСА [5–7] имеет вид

$$F = (B_{01})S_{01}S_{02}A_{01}P_{01}B_{01}C_{01}C_{02}S_{03}S_{04}S_{05}C_{03}(B_{02})(B_{03})(B_{04})(B_{05})(B_{06})S_{06}A_{02}P_{02}B_{02}C_{04}C_{05}A_{03}P_{03}B_{03}C_{06}C_{07}A_{04}P_{04}B_{04}C_{08}C_{09}A_{05}P_{05}B_{05}C_{10}C_{11}A_{06}P_{06}B_{06}C_{12}C_{13}A_{07}P_{07}B_{07}C_{13}(B_{07})C_{14}.$$

В алгоритме использованы следующие обозначения операторов и логических условий:

B — переход алгоритма к указанному оператору (B_{0i}) при невыполнении логического условия;

S — ввод данных в компьютерную программу;

A — проверка соблюдения соответствующего логического условия;

P — логическое условие выполняется;

C — счет.

Набор операторов и логических условий алгоритма:

S_{01} — ввод данных о количестве составов с материалами, требующими транспортировки (по наименованиям — щебень, ПЩГС, длинномеры, рельсошпальная решетка, прочие материалы, требующие отдельной транспортировки), с учетом массы состава и количества осей в нем;

S_{02} — ввод информации о путевых машинах и их комплексах, требующих транспортировки отдельным локомотивом или в составе поезда, с учетом массы состава и количества осей в нем;

A_{01} — возможность сформировать состав из нескольких путевых машин или включить их в состав других хозяйственных поездов, а также транспортировать в хвостовой части грузовых поездов;

C_{01} — расчет общего количества хозяйственных поездов, следующих к месту проведения работ;

C_{02} — расчет общего количества локомотивов, используемых в хозяйственном движении;

S_{03} — ввод информации по участкам при транспортировке материалов и путевых машин от станции их дислокации до станции назначения с учетом минимальной критической массы на всем протяжении;

S_{04} — ввод информации о дальности транспортировки для каждого хозяйственного поезда;

S_{05} — ввод постоянного значения времени транспортировки техники и материалов к месту проведения работ;

C_{03} — расчет времени занятости локомотивов непосредственно при транспортировке;

S_{06} — ввод информации по локомотивам, используемым в хозяйственном движении;

A_{02} — соответствие локомотива i -го типа для транспортировки хозяйственного поезда по заданию $s_{01}, s_{02}, s_{03}, s_{04}$;

C_{04} — расчет количества локомотивов i -го типа, задействованных для транспортировки хозяйственных поездов к месту проведения работ;

C_{05} — расчет времени занятости локомотивов i -го типа;

A_{03} — соответствие локомотива j -го типа для транспортировки хозяйственного поезда по заданию $s_{01}, s_{02}, s_{03}, s_{04}$;

C_{06} — расчет количества локомотивов j -го типа, задействованных для транспортировки хозяйственных поездов к месту проведения работ;

C_{07} — расчет времени занятости локомотивов j -го типа;

A_{04} — соответствие локомотива n -го типа для транспортировки хозяйственного поезда по заданию $s_{01}, s_{02}, s_{03}, s_{04}$;

C_{08} — расчет количества локомотивов n -го типа, задействованных для транспортировки хозяйственных поездов к месту проведения работ;

C_{09} — расчет времени занятости локомотивов n -го типа;

A_{05} — соответствие локомотива m -го типа для транспортировки хозяйственного поезда по заданию $s_{01}, s_{02}, s_{03}, s_{04}$;

C_{10} — расчет количества локомотивов m -го типа, задействованных для транспортировки хозяйственных поездов к месту проведения работ;

C_{11} — расчет времени занятости локомотивов m -го типа;

A_{06} — соответствие локомотива v -го типа для транспортировки хозяйственного поезда по заданию $s_{01}, s_{02}, s_{03}, s_{04}$;

C_{12} — расчет количества локомотивов v -го типа, задействованных для транспортировки хозяйственных поездов к месту проведения работ;

C_{13} — расчет времени занятости локомотивов v -го типа;

A_{07} — линия на тепловозном виде тяги;

C_{14} — расчет количества грузовых тепловозов;

C_{15} — расчет количества грузовых электровозов.

Удобная для обозрения блок-схема алгоритма распределения локомотивов для обеспечения транспортировки материалов и путевой техники к месту проведения работ (рис. 1) представляет основные блоки и переходы, зависящие от логических условий.

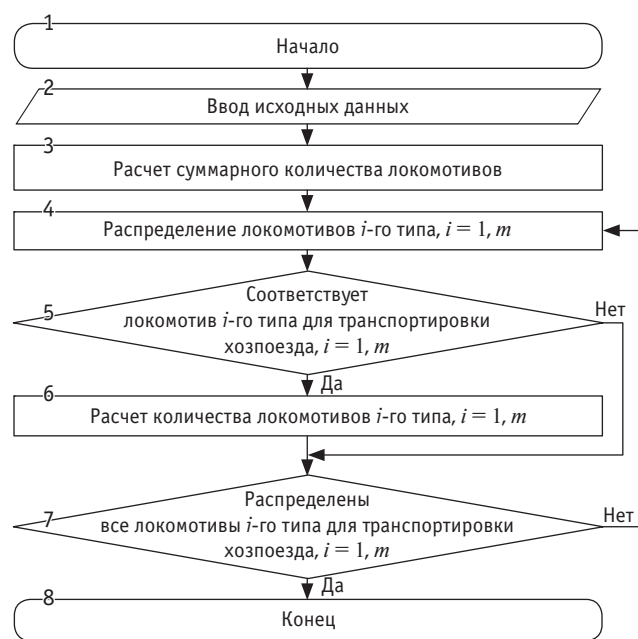


Рис. 1. Блок-схема алгоритма распределения локомотивов для обеспечения транспортировки материалов и путевой техники к месту проведения работ

Поскольку в хозяйственном движении среднесуточный спрос на локомотивы более 120 ед., на ряде участков в условиях массового предоставления «окон», в том числе значительной продолжительности, часто используются локомотивы большей мощности, чем потребная, что приводит к отсутствию тяговых ресурсов на участковой станции [8] и последующим затруднениям в эксплуатационной работе.

С учетом параметров, используемых при работе алгоритма, получены коэффициенты перераспределения в потребности парка локомотивов. Итоговые значения полигона Октябрьской железной дороги при транспортировке хозяйственных поездов на основе анализа более 600 случаев:

тепловозы магистральные пассажирские — 1,1;

электровозы магистральные пассажирские — 1,2;

тепловозы маневровые — 1,55;

электровозы магистральные грузовые — 0,7;

тепловозы магистральные грузовые — 0,65.

Таким образом, как видно из рассмотренного примера, по сравнению с действующими методиками использование алгоритма позволило снизить потребное количество магистральных грузовых электровозов и тепловозов на 30 и 35 % соответственно и высвободить их для грузового движения, испытывающего дефицит в локомотивной тяге.

Важным результатом применения предлагаемого алгоритма при планировании путевых и других работ является повышение эффективности использования тяговых ресурсов.

Литература

1. Феоктистов Л. В. Комплексное планирование ремонтно-строительных работ и движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2013. № 4. С. 21–24. ISSN 0044–4448.
2. Энциклопедия по машиностроению XXL [Электронный ресурс]. URL: <http://mash-xxl.info/page/220138157224128127124184008038194106026135195093/> (дата обращения: 16.12.2015).
3. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава / утв. Минтранс России 03.06.14 № 151 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rcit.ru/techinfo55.html#ti66-p11> (дата обращения: 16.12.2015).
4. О порядке выдачи локомотивов в хозяйственное движение с учетом соответствия типа локомотива выполняемому характеру работ / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.07.15 № 1654р. М. : ОАО «РЖД», 2015. 9 с.
5. Ляпунов А. А., Шестопал Г. А. Об алгоритмическом описании процессов управления // Математическое просвещение. 1957. № 2. С. 81–95.
6. Тимченко В. С. Алгоритмизация процессов оценки пропускной способности железнодорожных участков в условиях предоставления окон // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 5 (48). С. 34–37. ISSN 2306–9112.
7. Тимченко В. С. Алгоритмы расчета графиков проведения ремонтных работ железнодорожного пути на перспективу // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Т. 6. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://elibrary.ru/download/97993295.pdf> (дата обращения: 16.12.2015).
8. Хомич Д. И. Определение потребности в тяговых ресурсах при проведении работ на объектах инфраструктуры железных дорог России // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 49–52. ISSN 1815–9400.

References

1. Feoktistov L. V. Kompleksnoe planirovanie remontno-stroitelnykh rabot i dvizheniya poezdov [Comprehensive planning of construction works and train traffic] // Zheleznodorozhnyi transport. 2013. № 4. S. 21–24. ISSN 0044–4448.
2. Entsiklopediya po mashinostroeniuyu XXL [Mechanical Engineering Encyclopedia XXL]. [Electronic resource]. URL: <http://mash-xxl.info/page/220138157224128127124184008038194106026135195093/> (date accessed: 16.12.2015).
3. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Rules of service of brake equipment and brake control of railway rolling stock] / utv. Mintransom Rossii 03.06.14 № 151 [Electronic resource]. URL: <http://www.rcit.ru/techinfo55.html#ti66-p11> (date accessed: 16.12.2015).
4. O poryadke vydachi lokomotivov v khozyaystvennoe dvizhenie s uchytom sootvetstviya tipa lokomotiva vypolnyaemomu kharakteru rabot [Procedure for releasing locomotives for commercial operation, matching the locomotive to the nature of the operations] / utv. rasporyazheniem ОАО «RZhD» ot 02.07.15 № 1654r. M. : ОАО «RZhD», 2015. 9 s.
5. Lyapunov A. A., Shestopal G. A. Ob algoritmicheskom opisani protsessov upravleniya [On algorithmic description of control processes] // Matematicheskoe prosveshchenie. 1957. № 2. S. 81–95.
6. Timchenko V. S. Algoritimizatsiya protsessov otsenki propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov v usloviyakh predostavleniya okon [Algorithmization of railway section capacity evaluation procedures in time-window context] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2013. № 5 (48). S. 34–37. ISSN 2306–9112.
7. Timchenko V. S. Algoritmy raschyota grafikov provedeniya remontnykh rabot zheleznodorozhnogo puti na perspektivu [Algorithms for calculation of railway track repair schedules for the future] // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2014. T. 6. № 3 [Electronic resource]. URL: <http://elibrary.ru/download/97993295.pdf> (date accessed: 16.12.2015).
8. Khomich D. I. Opredelenie potrebnosti v tyagovykh resursakh pri provedenii rabot na ob'yektakh infrastruktury zheleznykh dorog Rossii [Determining the need for traction resources when carrying out works at the facilities of Russian railway infrastructure] // Transport of the Urals. 2014. № 3 (42). S. 49–52. ISSN 1815–9400.

УДК 656.259.9

Борис Викторович Рожкин, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ К ПРОПУСКУ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ

Boris Viktorovich Rozhkin, Senior Lecturer, Department of Railway Automation, Telemechanics and Communication, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Assessment of readiness of automation devices for heavy train traffic

Аннотация

Представлена методика определения коэффициента готовности обратной тяговой сети участка железной дороги к пропуску токовой нагрузки от движения поездов повышенной массы и длины. Одной из причин сбоев в графике движения таких поездов является незапланированная остановка перед красным сигналом из-за ложной занятости следующей рельсовой цепи, что обусловлено асимметрией обратного тягового тока. В статье предложен метод оценки вероятности безотказной работы рельсовой цепи блок-участка за счет использования резервов устойчивости рельсовых цепей по параметру асимметрии тягового тока.

Ключевые слова: асимметрия тягового тока, матрица рисков, коэффициент готовности, тяжеловесное движение.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-61-65

Summary

A method for determining the coefficient of readiness of reverse traction network of a railway station for the current load of trains with increased weight and length has been presented. For these trains, one of the reasons for departures from schedule is an unplanned stop at the red signal because of false occupancy of the next track circuit, caused by return traction current asymmetry. The paper proposes a method for estimating the probability of failure-free operation of track circuit of a block section that involves the use of traction current asymmetry stability reserves of track circuits.

Keywords: traction current asymmetry, risk matrix, availability factor, heavy train traffic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-61-65

Повышение объема перевозок и исчерпание провозной способности на отдельных направлениях магистральных железных дорог привело к увеличению весовой нормы поездов до 9, а в перспективе до 12 тыс. т. При этом на участках, электрифицированных на постоянном токе, величины токов в прямой и обратной тяговых сетях приблизились к критическим значениям, что увеличило риск срыва графика движения, в том числе из-за отказа рельсовых цепей. Остановка поезда повышенной массы перед ложно занятой секцией вызывает существенное отклонение исполненного графика движения от нормативного. Поэтому необходимым условием вождения тяжеловесных поездов по «твердым» ниткам должна быть численная оценка готовности участков к их пропуску.

На электрифицированных участках появление отказа «ложная занятость» у перегонных рельсовых цепей обусловлено в том числе ненормативной асимметрией обратного тягового тока, приводящей к насыщению дроссель-трансформаторов и выключению путевых реле при свободном участке вследствие изменения входного сопротивления конца рельсовой цепи более чем на 10 %. При этом работы по выявлению участков с ненормативной асимметрией не носят периодического характера. Непосредственное измерение тока асимметрии, согласно текущей технологии обслуживания [1], производится в случае устранения отказов АЛСН или при регулировке рельсовых цепей, когда исчерпаны другие методы регулировки. Этот подход называют аварийной стратегией технического обслуживания [2], и ее использование в данном случае обусловлено трудоемкостью планово-предупредительных мероприятий в отношении асимметрии. К тому же в нормативных документах службы пути [3] указывается на необходимость периодического контроля наличия приварных стыковых соединителей и электротяговых перемычек. Вышеупомянутый перечень мероприятий обеспечивает устойчивую работу основой массы рельсовых цепей, а аварийная концепция технического обслуживания позволяет полностью использовать заложенный в оборудовании технический ресурс.

С повышением весовой нормы поездов требования к параметрам надежности элементов и качеству содержания элементов инфраструктуры возрастают. Так, система тягового энергоснабжения должна быть готова к передаче необходимой

токовой нагрузки на локомотив, путь должен быть готов воспринять статические и динамические усилия от состава, рельсовые цепи должны устойчиво работать при увеличенных параметрах тягового тока, протекающего по рельсовым нитям. Комплекс мероприятий, проводимый для обеспечения безостановочного пропуска поездов, включает в себя усиление системы тягового энергоснабжения и симметрирование рельсовых нитей. Однако метода, позволяющего определить эффект таких мероприятий и получить априорную численную оценку готовности устройств автоматики к работе в условиях движения тяжеловесных поездов, на текущий момент не существует.

В настоящей статье рассматривается предлагаемая методика определения коэффициента готовности обратной тяговой сети участка к пропуску токовой нагрузки от движения тяжеловесных поездов. Основным условием оценки коэффициента готовности является недопущение ложной занятости рельсовой цепи блок-участка из-за асимметрии тягового тока.

Асимметрия тягового тока — термин, описывающий разницу тягового тока, протекающего по разным рельсовым нитям одного блок-участка:

$$I_{\text{асим}} = I_1 - I_2 \quad (1)$$

где I_1 и I_2 — ток в левой и правой рельсовой нитке блок-участка.

При этом для относительной оценки асимметрии введен коэффициент асимметрии, определяемый как отношение тока асимметрии к полному току дроссель-трансформатора:

$$K_{\text{асим}} = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2} \quad (2)$$

Очевидно, что обеспечить абсолютно равное электрическое сопротивление рельсовых нитей одного пути невозможно в силу объективных причин. Поэтому в дроссель-трансформаторы заложена возможность работать при определенном токе асимметрии. В табл. 1 приведены используемые в настоящее время дроссель-трансформаторы и допустимые параметры тока асимметрии по конструкторской и нормативной документации [4, 5].

Так как за главный критерий готовности электротехнического оборудования обратной тяговой сети принято отсутствие

отказов из-за асимметрии обратного тягового тока, то коэффициент готовности участка будет численно равен вероятности неперевышения тока асимметрии критических значений в некоторый временной интервал. Для качественной оценки степени приближения режима работы к критическим значениям введем понятие «категория риска отказа». Чтобы определить граничные значения категорий риска, необходимо соотнести значения тока асимметрии дроссель-трансформатора с конструктивными и нормативными значениями. Так, общепризнанный заводской разброс параметров $\pm 10\%$ для дроссель-трансформатора даст градацию рисков, приведенную в табл. 2. Коэффициент 0,9 разграничивает гарантированную устойчивую работу рельсовых цепей от работы с неопределенной вероятностью, обусловленной случайным заводским разбросом параметров.

Дальнейшие пояснения лучше проиллюстрируем на примере: пусть необходимо определить коэффициент готовности участка железной дороги, состоящего из 8 одинаковых блок-участков, к пропуску тяжеловесных поездов. Каждый блок-участок оборудован дроссель-трансформаторами типа ДТ-0.2-1500, и для них известны статистические параметры распределения обратного тягового тока и коэффициента асимметрии — $N(2000, 1000)$ и $N(0,04, 0,01)$ соответственно.

В первую очередь определим граничные значения для каждой категории риска ложной занятости на участке по формулам, приведенным в табл. 2, результаты расчетов занесем в табл. 3, сохранив градацию по категориям риска.

Далее составим таблицу значений тока асимметрии в зависимости от коэффициента асимметрии и тока дроссель-трансформатора и нанесем на ячейки этой таблицы категории рисков из табл. 3. При построении используем значения тока в обратной тяговой сети в диапазоне от 0 до 8000 А с шагом 1000 А. Значения коэффициента асимметрии возьмем в диапазоне от 0 до 10% с шагом 1% (табл. 4).

В табл. 4 цветами показаны уровни риска отказа рельсовой цепи из-за асимметрии тягового тока в зависимости от коэффициента асимметрии участка и токовой нагрузки на дроссель-трансформатор. Таким образом, зная ток и коэффициент асимметрии, мы можем оценить риск сбоя в графике движения поездов при указанной токовой нагрузке и состоянии рельсовой линии.

Таблица 1

Конструкционные и нормативные параметры асимметрии дроссель-трансформаторов

Марка / год	Номинальный ток ДТ, А	Конструктивный максимальный ток асимметрии, А	Максимальный $K_{\text{асим}}$ при номинальном токе, %	Нормативный ток асимметрии, А	Нормативный $K_{\text{асим}}$ при номинальном токе, %
ДТ-0,2-1000 / до 1995	2000	240	12	120	6
ДТ-0,6-1000 / до 1995	2000	240	12	120	6
ДТ-0,6-1000Х / до 1995	2000	300	15	120	6
ДТ-0,6-1000МХ / до 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,2-1000 / после 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,6-1000 / после 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,2-1500 / после 1995	3000	400	13,(3)	180	6
ДТ-0,2-1500 / после 1995	3000	400	13,(3)	180	6

Таблица 2

Качественная оценка риска защитного отказа рельсовой цепи

Уровень риска	Описание уровня риска
Недопустимый	Ток асимметрии больше максимального конструктивного тока асимметрии: $I_{\text{асим}} > I_{\text{асим.констр}}$
Нежелательный	Ток асимметрии больше 90 % от максимального конструктивного тока асимметрии, но меньше максимального конструктивного: $I_{\text{асим.констр}} > I_{\text{асим}} > 0,9 \cdot I_{\text{асим.констр}}$
Допустимый	Ток асимметрии больше максимального нормативного, но менее 90 % от максимального конструктивного: $I_{\text{асим.норм}} < I_{\text{асим}} < 0,9 \cdot I_{\text{асим.констр}}$
Незначительный	Ток асимметрии меньше максимального нормативного значения: $I_{\text{асим.норм}} > I_{\text{асим}}$

Таблица 3

Граничные значения токов асимметрии ДТ-0.2–1500

Уровень риска	Граничные значения, А
Недопустимый	[400; ∞}
Нежелательный	[320; 400}
Допустимый	[180; 320}
Незначительный	[0; 180}

Таблица 4

Значения тока асимметрии и уровни риска появления ложной занятости рельсовой цепи

Коеф-фициент асимметрии	Значение тягового тока в обратной тяговой сети							
	1000 А	2000 А	3000 А	4000 А	5000 А	6000 А	7000 А	8000 А
1 %	10	20	30	40	50	60	70	80
2 %	20	40	60	80	100	120	140	160
3 %	30	60	90	120	150	180	210	240
4 %	40	80	120	160	200	240	280	320
5 %	50	100	150	200	250	300	350	400
6 %	60	120	180	240	300	360	420	480
7 %	70	140	210	280	350	420	490	560
8 %	80	160	240	320	400	480	560	640
9 %	90	180	270	360	450	540	630	730
10 %	100	200	300	400	500	600	700	800

Для численной оценки риска по известным законам распределения получим вероятности попадания случайной величины в ранее заданные диапазоны, используя формулу

$$P(X_1 < x < X_2) = P(X_2) - P(X_1), \quad (3)$$

где X_1 и X_2 — граничные значения диапазонов.

Указанием границ изменения тока в обратной тяговой сети и коэффициента асимметрии мы, по сути, переходим к усеченным нормальным законам, поэтому необходимо рассчитать коэффициенты нормировки по формуле

$$c = \frac{1}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)}, \quad (4)$$

где Φ_0 — значение функции Лапласа;

μ и σ — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины соответственно.

Для рассматриваемых законов распределения коэффициенты нормировки составят 1,02328 для тока, и 1,00003 для коэффициента асимметрии. Функции распределения законов представлены на рис. 1 и 2. Вероятности попадания тока в обратной тяговой сети в интервалы из табл. 4 приведены в табл. 5.

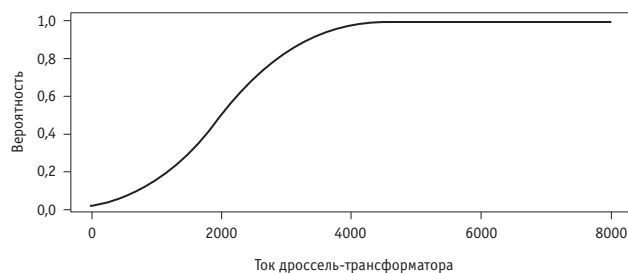


Рис. 1. Функция распределения обратного тягового тока

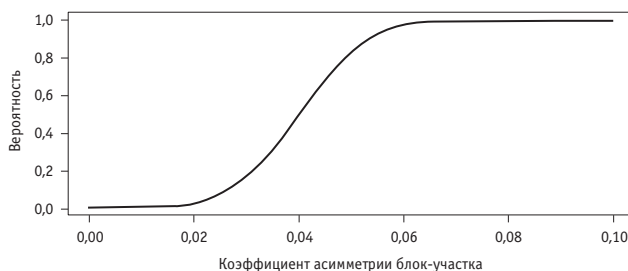


Рис. 2. Функция распределения коэффициента асимметрии

Таблица 5

Распределение вероятностей значений тягового тока в элементах ОТС

Интервал значений тягового тока, А	Вероятность попадания в заданный интервал
0–1000	0,139068971
1000–2000	0,349291205
2000–3000	0,349291205
3000–4000	0,139068971
4000–5000	0,021898427
5000–6000	0,001348915
6000–7000	3,21152E-05
7000–8000	2,92315E-07

Таким же образом определим вероятность попадания значений коэффициента асимметрии в диапазоны табл. 4, а полученные вероятности занесем в табл. 6.

Таблица 6

Распределение вероятностей значений коэффициента асимметрии

Интервал $K_{асим}$ блок-участка, %	Вероятность попадания в интервал
0–1	0,001318267
1–2	0,021400872
2–3	0,135909177
3–4	0,34135494
4–5	0,34135494
5–6	0,135909177
6–7	0,021400872
7–8	0,001318267
8–9	3,13855E-05
9–10	2,85674E-07

Значения, приведенные в табл. 5 и 6, дают возможность определить вероятности сочетаний тока и коэффициента асимметрии из рассмотренных ранее диапазонов. Для расчета сочетаний воспользуемся правилом определения вероятности совместных событий и полученные данные сведем в табл. 7. Цвета ячеек перенесены из табл. 4 и отражают качественную оценку риска появления ложной занятости для каждого сочетания тока и коэффициента асимметрии.

Далее определим вероятность появления отказа ложной занятости в каждой категории риска. В силу того что события в ячейках табл. 7 несовместны, определение риска отказа для каждой категории сведется к суммированию чисел в ячейках одинакового цвета. Рассчитанные вероятности приведены в табл. 8.

Все уровни риска отказа образуют полную группу событий, и сумма их вероятностей должна быть равна 1, но в нашем примере она составляет 0,999998284, что объясняется округлением значения функции Лапласа до 4-го знака после запятой.

Поскольку критерием готовности участка к пропуску тяжеловесных поездов является отсутствие отказов рельсовых цепей из-за асимметрии тягового тока, коэффициент готовности одного блок-участка определим как вероятность незначительного или допустимого уровня риска

$$K_{\text{гот.бл.-уч}} = P_{\text{незн.р}} + P_{\text{доп.р}}, \quad (5)$$

а коэффициент готовности участка в целом будет равен произведению коэффициентов готовности всех блок-участков

$$K_{\text{гот.уч}} = \prod_{i=1}^n K_{\text{гот.бл.-уч}i}, \quad (6)$$

где n — число блок-участков на участке железной дороги.

При условии идентичности параметров блок-участков готовность всего участка можно рассчитать по формуле

$$K_{\text{гот.уч}} = K_{\text{гот.бл.-уч}}^n. \quad (7)$$

В рассмотренном примере коэффициент готовности блок-участков составит 0,99908, а участка железной дороги в целом — 0,99268.

Таблица 7

Вероятностная оценка риска защитного отказа рельсовой цепи

Коэффициент асимметрии	Значение тягового тока в обратной тяговой сети							
	0–1000 А	1000–2000 А	2000–3000 А	3000–4000 А	4000–5000 А	5000–6000 А	6000–7000 А	7000–8000 А
0–1 %	0,00018333	0,000460459	0,000460459	0,00018333	2,8868E-05	1,77823E-06	4,23364E-08	3,85349E-10
1–2 %	0,002976197	0,007475136	0,007475136	0,002976197	0,000468645	2,8868E-05	6,87294E-07	6,2558E-09
2–3 %	0,018900749	0,04747188	0,04747188	0,018900749	0,002976197	0,00018333	4,36475E-06	3,97283E-08
3–4 %	0,04747188	0,119232278	0,119232278	0,04747188	0,007475136	0,000460459	1,09627E-05	9,97833E-08
4–5 %	0,04747188	0,119232278	0,119232278	0,04747188	0,007475136	0,000460459	1,09627E-05	9,97833E-08
5–6 %	0,018900749	0,04747188	0,04747188	0,018900749	0,002976197	0,00018333	4,36475E-06	3,97283E-08
6–7 %	0,002976197	0,007475136	0,007475136	0,002976197	0,000468645	2,8868E-05	6,87294E-07	6,2558E-09
7–8 %	0,00018333	0,000460459	0,000460459	0,00018333	2,8868E-05	1,77823E-06	4,23364E-08	3,85349E-10
8–9 %	4,36475E-06	1,09627E-05	1,09627E-05	4,36475E-06	6,87294E-07	4,23364E-08	1,00795E-09	9,17447E-12
9–10 %	3,97283E-08	9,97833E-08	9,97833E-08	3,97283E-08	6,2558E-09	3,85349E-10	9,17447E-12	8,35067E-14

Таблица 8

Вероятности рисков для блок-участка

Уровень риска	Вероятность риска
Недопустимый	6,55317E-05
Нежелательный	0,000850733
Допустимый	0,096158339
Незначительный	0,902923681

Таким образом, представленный метод позволяет определить априорный коэффициент готовности участка к пропуску тяжеловесных поездов. К проблемам реализации предложенного метода можно отнести отсутствие на текущий момент способа получения необходимых статистических данных и отсутствие нормативной документации, регламентирующей требуемый уровень готовности инфраструктуры в зависимости от категорийности линий.

Литература

1. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. М. : ОАО «РЖД», 2014. 118 с.
2. Назарычев А. Н. Основные принципы и критерии управления техническим состоянием электрооборудования // Вестник ИГЭУ. 2006. № 2. С. 67–71. ISSN 2072–2672.
3. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. М. : ОАО «РЖД», 2012. 234 с.
4. Сороко В. И., Милуков В. А. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. / Кн. 1 ; 3-е изд. М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. 960 с.
5. Устройства и элементы рельсовых цепей и обратной тяговой сети. Технические требования и нормы содержания. М. : ОАО «РЖД», 2012. 32 с.

References

1. Instruksiya po tekhnicheskoy ekspluatatsii ustroystv i sistem signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki [Regulations for technical operation of signaling, centralization and blocking devices and systems]. M. : OAO «RZhD», 2014. 118 s.
2. Nazarychev A. N. Osnovnye printsipy i kriterii upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem elektrooborudovaniya [Basic principles and criteria for condition management of electrical equipment] // Vestnik IGEU. 2006. № 2. S. 67–71. ISSN 2072-2672.
3. Instruksiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti [Instructions for current maintenance of railway tracks]. M. : OAO «RZhD», 2012. 234 s.
4. Soroko V. I., Milyukov V. A. Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemechaniki : sprav. [Railway automation and telemechanics equipment : a handbook] / Kn. 1 ; 3-e izd. M. : NPF «PLANETA», 2000. 960 s.
5. Ustroystva i elementy relsovykh tsepey i obratnoy tyagovoy seti. Tekhnicheskie trebovaniya i normy sodержaniya [Devices and elements of track circuits and reverse traction network. Technical specifications and maintenance standards]. M. : OAO «RZhD», 2012. 32 s.

УДК 681.518.54:621.313.13

Адам Пантелеевич Разгонов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Александр Юрьевич Лебедев, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Антон Юрьевич Журавлев, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Сергей Александрович ЩигOLEV, кандидат технических наук, председатель совета директоров ВНТЦ «Уралжелдоравтоматизация», Екатеринбург

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Adam Panteleevich Razgonov, DSc in Engineering, Professor, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Alexander Yurievich Lebedev, graduate student, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Anton Yurievich Zhuravlyov, Assistant Lecturer, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Sergey Alexandrovich Shchigolev, PhD in Engineering, Chairman of the Board of Directors, Uralzheldoravtomatizatsiya, Ekaterinburg

Diagnosis of electric machines using wireless data transmission channels

Аннотация

В статье предложен частотный метод для диагностики параметров обмоток, представлена электрическая схема для оценки амплитудно-частотных характеристик обмоток в режимах холостого хода и короткого замыкания. Для тягового двигателя и электродвигателя стрелочного привода сняты характеристики, определены волновые параметры линии. Рассчитаны первичные параметры обмоток. На основе сравнения полученных аналитических параметров с параметрами предыдущих измерений сделано заключение (с учетом технических допусков) о запасе работоспособности объекта диагностики. Предложено для передачи информации использовать беспроводные каналы на базе технологии ZigBee, которая дает возможность упростить разработку проекта, снизить затраты на его реализацию и существенно сократить сроки внедрения системы в эксплуатацию. Дана краткая характеристика основных модулей технологии ZigBee: координатора, оформляющего путь дерева сети, маршрутизатора, играющего роль передающего звена с других устройств, и конечного устройства, позволяющего обмениваться информацией с родительским узлом либо с координатором или маршрутизатором.

Ключевые слова: электрическая машина, цепь с распределенными параметрами, амплитудно-частотная характеристика, волновые и первичные параметры обмоток, беспроводной канал связи.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-66-71

Summary

This paper proposes a frequency method for the diagnosis of winding parameters, and presents a circuit diagram for evaluating frequency response function of windings in idling and short circuit mode. Characteristics of a traction motor and switch gear motor have been obtained, and line wave parameters defined. Primary winding parameters have been calculated. Based on the comparison of analytical parameters with the previous measurements, a conclusion is made (taking into account technical tolerances) on operation capability of the item under diagnosis. It is proposed to use wireless channels based on ZigBee technology to transfer information, which makes it possible to simplify project development, reduce the costs of its implementation and significantly reduce the time of implementation of the system. A brief description of the main ZigBee modules is given: a coordinator that draws tree network path, a router acting as a transmission link for other devices and an end device enabling communication with the parent unit or coordinator or router.

Keywords: electric machine, chain with distributed parameters, frequency response function, wave and primary parameters of winding, wireless communication channel.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-66-71

С каждым годом к железнодорожному транспорту предъявляются все более серьезные требования по обеспечению безопасности и надежности функционирования. Вводятся в эксплуатацию скоростные и высокоскоростные поезда (Москва — Санкт-Петербург, Киев — Харьков и др.) с использованием трехфазных электрических машин, и каждая задержка такого поезда приводит к значительному изменению графика движения, снижению суточной пропускной способности дороги и существенным экономическим издержкам.

Обнаружение и устранение неисправностей в системах железнодорожной автоматики и электрооборудования локомотивов — довольно длительный процесс, поэтому очевидна необходимость в создании таких комплексов автоматизированной диагностики и контроля, которые ускорят поиск отказов и позволят прогнозировать их возникновение.

Известно, что обмотки электрических машин относятся к двухпроводным длинным линиям. Первичные параметры пассивных схем замещения линии (R , L , C и G), отнесенные к единице длины обмоток, используются при выборе структуры Т- и П-образных схем замещения. Для бесконечно малого элемента линии схемы замещения, включающей первичные параметры, составляются выражения в дифференциальной форме для распределения вдоль линии напряжений $\underline{U}(x) = \underline{U}$ и токов $\underline{I}(x) = \underline{I}$ источника гармонического сигнала. На основе этих выражений получают уравнения типа Гельмгольца [1]:

$$\begin{aligned} d^2 \underline{U} / dx^2 - \gamma^2 \underline{U} &= 0; \\ d^2 \underline{I} / dx^2 - \gamma^2 \underline{I} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ — коэффициент распространения линии.

Общие и частные решения выражений (1) после преобразований для стационарного режима процессов, которые протекают в линии, можно привести к уравнениям передачи четырехполюсника:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \operatorname{sh} \gamma l; \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ — напряжение и ток в начале линии;

\underline{Z}_c — характеристическое сопротивление линии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основе опыта эксплуатации электрических машин (электродвигателей, электрогенераторов) установлено, что срок их службы существенно зависит от состояния диэлектрика электроизоляционной конструкции обмоток. В свою очередь, качество изоляции со временем ухудшается за счет изменения макронеоднородности диэлектрика (растрескивание, насыщение влагой и др.). Поэтому по степени ухудшения макронеоднородности можно судить о динамике изменения электрической изоляции обмоток.

Результаты, полученные в работе [2], показали, что критерием степени изменения неоднородности изоляции диэлектрика может служить величина его суммарной емкости, обусловленная геометрией, абсорбционной емкостью и сопротивлением, связанными, в свою очередь, с явлением абсорбции неоднородностей. Причем величины этих параметров напрямую зависят от состояния изоляции диэлектрика. Однако нужно отметить, что рассматриваемый в работе [2] импульсный метод определения суммарной емкости не лишен недостатков. К ним прежде всего следует отнести технические трудности, требующие специальной и сложной аппаратуры, отсутствие которой приводит к снижению достоверности оценки малых емкостей (нФ, пФ) диэлектриков и сопротивлений обмоток.

Цель наших исследований заключается в разработке и внедрении частотных методов диагностики состояния электрических машин для построения компьютерного комплекса. Предлагаемый метод оценки времени старения изоляции обмоток электрических машин по емкости диэлектрика с использованием современной измерительной техники (цифровых амперметров, вольтметров, аналого-цифровых преобразователей и др.) позволяет упростить методику определения и повысить достоверность оценки. Метод может стать основой для построения системы технической диагностики (ТД) электрических, а также тяговых машин, а в последующем привести к изменению стратегии профилактики этих объектов с планово-профилактической на стратегию «по состоянию объекта».

Частотные характеристики (ЧХ) цепей с распределенными параметрами (ЦРП), как правило, определяют по зависимости входных сопротивлений от частоты:

$$\underline{Z}_{\text{BX}} = \underline{Z}_{\text{BX}} \cdot e^{j\varphi_{\text{BX}}} = \underline{Z}(j\omega). \quad (3)$$

Уравнения для сопротивления расписываются по двум составляющим — амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристикам:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{BX}} &= \operatorname{mod} \underline{Z}_{\text{BX}} = \underline{Z}(\omega); \\ \varphi_{\text{BX}} &= \arg \underline{Z}_{\text{BX}} = \varphi(\omega). \end{aligned} \quad (4)$$

Обычно ЧХ ЦРП исследуют в граничных режимах — холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) [3]:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{X}} &= \underline{Z}_{\text{X}}(\omega); \varphi_{\text{X}} = \varphi_{\text{X}}(\omega); \\ \underline{Z}_{\text{K}} &= \underline{Z}_{\text{K}}(\omega); \varphi_{\text{K}} = \varphi_{\text{K}}(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

АЧХ — носитель важной информации о свойствах и параметрах цепей, которые она отображает [4]. Установлено, что $\underline{Z}_{\text{BX}}$ обмоток электрических машин, как правило, имеет емкостный характер в режиме холостого хода и индуктивный — в режиме короткого замыкания, если в цепи еще не возникли резонансные явления. Экстремумы $\underline{Z}_{\text{BX}}$ соответствуют резонансу тока (РТ), а минимумы — резонансу напряжения (РН). Число резонансов может быть 3, поскольку с ростом частоты схема переходит из колебательного режима в апериодический — наблюдается возрастание активного сопротивления $r_{\text{акт}}$, что объясняется свойствами собственных чисел. Частотную характеристику можно использовать для вычисления первичных и вторичных параметров ЦРП. Эти параметры можно определять и по одной точке на АЧХ, но лучше брать ряд точек.

Построение АЧХ предполагает измерение комплексных сопротивлений $\underline{Z}(\omega)$. Отметим, что длинные линии обмоток электродвигателя с П- и Т-звеньями относятся к так называемым минимально фазовым звеньям [5]. Их признаком служит размещение всех полюсов передаточной функции в левой полуплоскости $p = -\delta + j\omega$.

Для таких цепей существует взаимное и однозначное комплексное соответствие между АЧХ и ФЧХ. Например, комплексная передаточная функция однородной цепной схемы (ОЦС) определяется по отношению напряжения K_u и тока K_i :

$$\frac{K_u}{K_i} = \frac{U_2 I_1}{U_1 I_2} = \frac{Z_2}{Z_{\text{BX}}},$$

откуда

$$\underline{Z}_{\text{BX}} = \frac{K_i}{K_u} Z_2. \quad (6)$$

Сложная комплексная функция частоты:

$$\underline{Z}_{\text{BX}} = \underline{Z}_{\text{BX}} \cdot e^{j\varphi_{\text{BX}}} = r(\omega) + jx(\omega), \quad (7)$$

где $\operatorname{Re}[\underline{Z}_{\text{BX}}] = r(\omega) = Z_{\text{BX}} \cdot \cos \varphi_{\text{BX}};$

$$\operatorname{Im}[\underline{Z}_{\text{BX}}] = x(\omega) = Z_{\text{BX}} \cdot \sin \varphi_{\text{BX}}.$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Если в некотором диапазоне частот известны АЧХ и ФЧХ, тогда модуль и аргумент [3] характеристического сопротивления:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k}; \quad \varphi_c = \frac{1}{2}(\varphi_x + \varphi_k),$$

где

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_c \leq \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Зная коэффициент распространения, можем записать:

$$\begin{aligned} \operatorname{th} \gamma l &= T e^{j\theta}; \quad T = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}}; \\ \theta &= \frac{1}{2}(\varphi_k - \varphi_x). \end{aligned} \quad (9)$$

Для обмоток электрических машин, электродвигателей обычно $T \leq 1$, для $\arg \theta$ ограничений нет. Из уравнений получаем значение параметра $2\beta l$, который в силу периодичности функции тангенса должен отвечать условию $2\beta l = 2\frac{\omega}{c}l$

(Нп/км), где $c = \frac{\omega}{\beta}$ — фазовая скорость, l — длина провода фазовой обмотки статора. Угол β можно приблизительно оценить по формуле $\beta \approx \omega \sqrt{LC}$.

Отсюда

$$\operatorname{th} 2\alpha l = \frac{2T \cos \theta}{1 + T^2}; \quad \operatorname{th} 2\beta l = \frac{2T \sin \theta}{1 - T^2}. \quad (10)$$

Таким образом, по модулям и аргументам входных сопротивлений \underline{Z}_x и \underline{Z}_k можно определить вторичные параметры обмоток.

Электрическая схема, позволяющая в лабораторных условиях построить АЧХ, ФЧХ обмоток статоров электрических машин (электрических двигателей стрелочных электроприводов и тяговых электродвигателей локомотивов) и измерить их параметры \underline{Z}_x , \underline{Z}_k , представлена на рис. 1. Она содержит измерительные приборы — амперметр, вольтметр и фазометр на базе МК типа Е20-10, генератор частоты типа ГЗ-103 и аналого-цифровой преобразователь.

Пример 1. Заданы параметры двигателя: мощность $P = 305$ кВт, напряжение на статоре 463 В, скорость вращения ротора 2290 об/мин, частота питания схемы испытаний 50–200 000 Гц и длина обмотки 210 м.

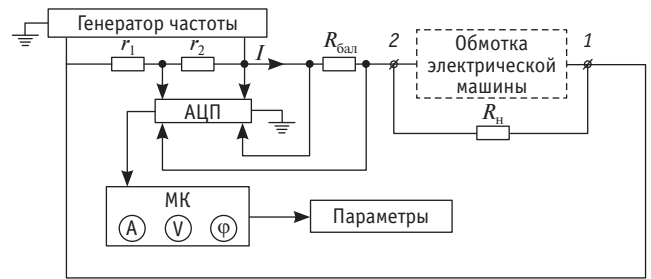


Рис. 1. Структурная электрическая схема для измерения параметров \underline{Z}_x и \underline{Z}_k и построения АЧХ и ФЧХ электрических машин

Экспериментально полученные АЧХ для режимов КЗ и ХХ опытного двигателя приведены на рис. 2¹.

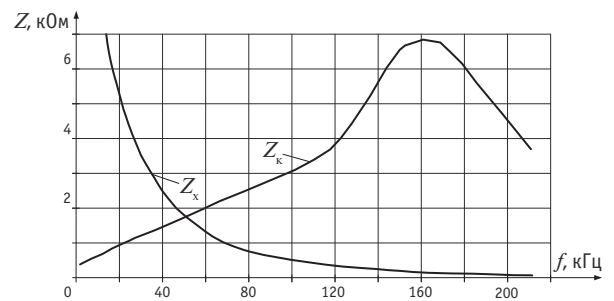


Рис. 2. АЧХ обмоток электродвигателя постоянного тока в режимах холостого хода и короткого замыкания

В режиме холостого хода найденное сопротивление $Z_x = 210$ Ом, его аргумент $\varphi_x = -15^\circ$; в режиме короткого замыкания сопротивление $Z_k = 6809$ Ом, его аргумент $\varphi_k = 21^\circ$.

Используя эти данные, получим характеристическое сопротивление линии:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_k} = 1194,141 + j62,582 \text{ Ом.}$$

Тогда гиперболический тангенс постоянной передачи будет иметь значение

$$\operatorname{th} \gamma l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_k}{\underline{Z}_x}} = 5,415 + j1,76.$$

Теперь имеется возможность определить постоянную передачи линии:

$$\gamma l = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \operatorname{th} \gamma l}{1 - \operatorname{th} \gamma l} \right) + j \frac{1}{2} \left(\arg \left(\frac{1 + \operatorname{th} \gamma l}{1 - \operatorname{th} \gamma l} \right) \right) = 0,168 + j3,03.$$

Зная, что $\gamma l = \alpha l + j\beta l$, далее легко определим коэффициенты затухания и фазы:

¹ На рисунке представлены АЧХ только для модулей сопротивлений \underline{Z}_x и \underline{Z}_k , для построения ФЧХ значения аргументов определяются по результатам измерений.

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \left| \frac{1 + \text{th} \gamma l}{1 - \text{th} \gamma l} \right| = 0,0008 \text{ Нп/м};$$

$$\beta = \frac{1}{2l} \left(\arg \left(\frac{1 + \text{th} \gamma l}{1 - \text{th} \gamma l} \right) \right) = 0,0144 \text{ рад/м}.$$

По результатам измерений волновых параметров линии можно вычислить также значения ее первичных параметров. Для этого следует приравнять действительную и мнимую ча-

сти уравнений $R + j\omega L = \gamma Z_c$ и $G + j\omega C = \frac{\gamma}{Z_c}$ и далее най-

ти параметры R , L , C и G [6]. Для обмоток электродвигателя рассчитаны следующие значения первичных параметров: $R = 52,7 \text{ Ом}$, $L = 1,72 \text{ мкГн}$, $G = 1,3 \text{ мкСм}$, $C = 11,95 \text{ пФ}$.

Пример 2. Для асинхронного стрелочного электродвигателя типа МСТ-0,25 (0,25 кВА, 220/127 В, 1250 об/мин) сняты АЧХ и ФЧХ одной фазы обмотки статора (рис. 3). Частота первого резонанса токов в режиме короткого замыкания $f_1 \approx 47 \text{ кГц}$. По обмоточной схеме число звеньев в ОЦС, заменившей фазную обмотку, $N = 4$. В соответствии с этим первое собственное число $|v_1| = 0,152$.

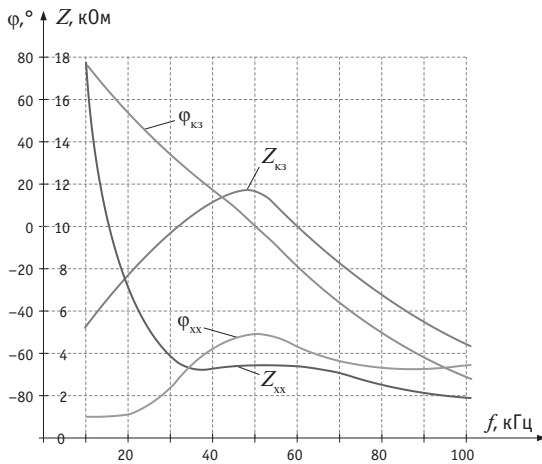


Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики одной фазы обмотки статора асинхронного стрелочного двигателя в режимах короткого замыкания и холостого хода

По АЧХ и ФЧХ входные сопротивления в режимах КЗ и ХХ равны:

$$Z_k = 11,7 \cdot 10^3 \cdot e^{j0,0698} \text{ Ом};$$

$$Z_x = 3,4 \cdot 10^3 \cdot e^{-j0,890} \text{ Ом}.$$

Используя эти данные, находим дополнительные параметры:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k} = 6,307 \cdot 10^3 \cdot e^{-j0,410} \text{ Ом};$$

$$A = \frac{1}{2N} \text{arth} \left(\frac{2z_c \cos \theta}{z_x + z_k} \right) = 0,119 \text{ Нп};$$

$$B = \frac{1}{2N} \text{arctg} \left(\frac{2z_c \sin \theta}{z_x - z_k} \right) = 0,0765 \text{ рад}.$$

Функция гиперболического тангенса от комплексного аргумента при $T \neq 1$ определяется следующим образом:

$$\text{th} \Gamma N = \frac{\text{sh} 2AN \pm j \sin 2BN}{\text{ch} 2AN + \cos 2BN} = 0,539 \cdot e^{-j0,4799}.$$

Далее вычисляем t , τ , S , g [1]:

$$t = \sqrt{\frac{\text{ch} A - \cos B}{\text{ch} A + \cos B}} = 0,071;$$

$$\tau = \text{arctg} \left(\pm \frac{\sin B}{\text{sh} A} \right) = 0,569 \text{ рад};$$

$$S = \sqrt{\text{sh}^2 A + \sin^2 B} = 0,142;$$

$$g = \text{arctg} \left(\frac{\text{tg} B}{\text{th} A} \right) = 0,574 \text{ рад}.$$

Модули и аргументы двухполюсников \underline{Z} и \underline{Y} для П-схемы замещения звена находим следующим образом:

$$z = S \sqrt{z_x z_k} = 893,9 \text{ Ом};$$

$$\xi = g + \varphi_c = 0,164 \text{ рад};$$

$$y = \frac{2t}{\sqrt{z_x z_k}} = 2,24 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$\zeta = \tau - \varphi_c = 0,979 \text{ рад}.$$

Затем вычисляем первичные параметры катушки для П-схемы замещения звена:

$$r = z \cdot \cos \xi = 906 \text{ Ом};$$

$$G = y \cdot \cos \zeta = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot y \cdot \sin \zeta = 6,31 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

Следует отметить, что значения r и G справедливы только при частоте 47 кГц, а значение C — при всех частотах.

Далее находим K :

$$K = \frac{(Gr + |v_1|)^2}{4|v_1|\omega_1 r(|v_1| \text{tg} \zeta - r\omega_1 C)} - \frac{C}{|v_1|} = 1,94 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

Это значение тоже справедливо при всех частотах.

Величину L определяем из выражения

$$L = \frac{z}{\omega_1 \sin \xi + \omega_1 K z} = 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

которое справедливо только при данной частоте.

Полученные таким образом значения первичных параметров при дальнейших профилактических измерениях через $\tau_{пр}$ могут сравниваться с вновь измеренными величинами. Это позволит оценить динамику их изменений, прогнозировать периодичность проведения профилактик и, как следствие, в значительной мере повысить эксплуатационную надежность электрических машин.

По значениям АЧХ и ФЧХ объектов профилактики методом синтеза можно построить электрические схемы замещения однородной цепной схемы с Т- или П-звеньями. Это позволит подробнее изучить другие параметры ОЦС (входное сопротивление при иных, кроме канонических, формах записи выражений, резонансные свойства и т. д.) и оценить погрешность.

Таким образом, исследования показали, что существует реальная возможность разработать мобильное автоматизированное цифровое диагностическое устройство, которое будет измерять параметры обмоток электрических машин в условиях локомотивных депо или ремонтно-технологических участков дистанций СЦБ.

ОРГАНИЗАЦИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОТ ОБЪЕКТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Сегодня с использованием беспроводных технологий решается достаточно широкий круг задач. Например, при помощи технологии ZigBee можно в короткие сроки организовать каналы связи в системе технической диагностики [7].

ZigBee — это спецификация сетевых протоколов верхнего уровня, которые используют сервисы нижних уровней: уровень управления доступом к среде MAC и физического РНУ, регламентированных стандартом IEEE 802.15.4. Спецификация ZigBee ориентирована на приложения, которые требуют гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и длительной работе сетевых устройств.

Способность к самоорганизации и самовоспроизведению, mesh-топология, защищенность, высокая помехоустойчивость, низкое энергопотребление и отсутствие необходимости получения частотного разрешения делают сеть ZigBee основой для беспроводной инфраструктуры систем позиционирования в режиме реального времени (RTLS).

Так как ZigBee способна активироваться за 15 мс или меньше, задержка отзыва устройства может быть очень низкой [8, 9]. Основное время ZigBee находится в спящем режиме, поэтому уровень потребляемой энергии от батарей также очень низкий. Возможен выбор оптимальных сетевых параметров и конфигурации радиопередатчиков для работы в качестве конечных спящих узлов ТД железнодорожной автоматики.

Технология ZigBee поддерживает не только простые топологии сети («точка — точка», «дерево» и «звезда»), но и самоорганизующивает и самовосстанавливает ячеистую топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Исполь-

зование сети ZigBee в частотном диапазоне 2,405–2,485 ГГц не требует частотных разрешений [8, 9].

Стандарт определяет работу на частотах 2,4 ГГц, на них существует 16 каналов ZigBee, каждый из которых требует ширины диапазона в 5 МГц. Основная частота для каждого канала может быть рассчитана как

$$FC = (2405 + 5 \cdot (ch - 1)) \text{ МГц},$$

где $ch = 11, 12, \dots, 26$.

Существуют три различных типа модулей ZigBee:

координатор ZigBee (ZC) — наиболее ответственное устройство, которое формирует путь дерева сети и может связываться с другими сетями. Он запускает сеть, может сохранять информацию о сетях, включая хранилище секретных паролей производства компании Trust Centre;

маршрутизатор ZigBee (ZR) может выступать в качестве вспомогательного маршрутизатора, передавая данные с других устройств. Он также может запустить функцию приложения;

конечное устройство ZigBee (ZED) — его функциональная загрузка позволяет обмениваться информацией с родительским узлом, но не может передавать данные с других устройств. ZED требует минимального количества памяти и поэтому может быть дешевле, чем ZR или ZC.

Модули ZigBee не требуют для работы дополнительных внешних компонентов, выпускаются с уже загруженным стекком ZigBee Pro и управляются при помощи AT-команд или API-интерфейсов (COM, USB, SPI или UART). Алгоритм работы модулей задается установкой конфигурации (например, автоматическое измерение аналогового сигнала и периодическая отправка с заданным интервалом этих значений на один или несколько узлов ZigBee-сети).

Правильный выбор параметров модулей требует построения наиболее оптимальной конфигурации беспроводной сети (расположение конечных устройств и число поддерживающих роутеров).

Таким образом, преимущества сети ZigBee делают целесообразным ее применение в дистанционной диагностике устройств железнодорожной автоматики. В качестве примера рассмотрим устройство диагностики стрелочных электродвигателей, удаленных от поста централизации (рис. 4).

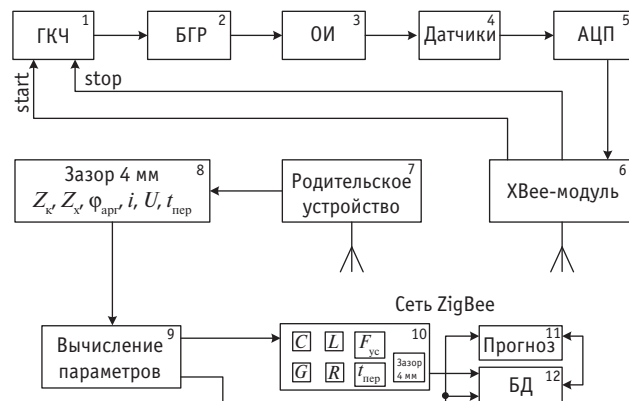


Рис. 4. Структурная схема устройства ТД стрелочных электродвигателей

Работа такого устройства состоит в следующем. Каждый раз в момент перевода стрелки родительское устройство 7 подает команду на Xbee-модуль 6. В результате последний выходит из состояния сна и включает генератор качающей частоты (ГКЧ) 1, который через блок гальванической развязки (БГР) 2 подает на объект исследования (ОИ) 3 (двигатель) электрический ток различной частоты в указанном диапазоне с заданным шагом. При помощи датчиков 4 АЦП 5 измеряет сигналы на выходе электродвигателя, а также величину зазора между острьяком и рамным рельсом и время перевода стрелки. После этого все измеренные данные посредством сети ZigBee передаются на родительское устройство 7 от Xbee-модуля 6, который после передачи данных отключает ГКЧ 1. Данные, полученные с родительского устройства, декодируются блоком 8, определяющим экстремумы функции зависимости входного сопротивления от частоты, а также время, напряжение и ток перевода стрелки, усилие на валу электродвигателя и зазор между прижатым острьяком и рамным рельсом. Эти данные передаются в блок вычисления параметров 9. После вычисления все необходимые параметры отображаются на экране монитора 10 АРМа электромеханика СЦБ вместе с прогнозируемым временем безотказной работы 11 соответствующего стрелочного электродвигателя и записываются в базу данных 12. Таким образом, устройство технической диагностики дает возможность планировать время проведения профилактики, исключать задержки поездов, а значит, минимизировать финансовые затраты.

ВЫВОДЫ

1. На основе использования частотного метода разработаны электрическая схема и алгоритм для построения АЧХ и ФЧХ обмоток электрических машин и измерения сопротивлений холостого хода и короткого замыкания. По результатам измерений и известной методике определены волновые параметры, позволяющие рассчитать первичные параметры обмоток (R , L , C и G). Причем, как показано на примерах, такой метод справедлив для электрических машин с мощностями, отличающимися на 3 порядка. Данные о динамике изменения электрических параметров позволяют своевременно планировать сроки проведения профилактических мероприятий, не допускать отказов в работе двигателей и нарушения графика движения поездов [10].

2. В разработанном устройстве ТД стрелочных электроприборов для организации каналов передачи информации от объектов диагностики до потребителей предложено использовать беспроводную технологию ZigBee. Обладая рядом преимуществ (способностью к самоорганизации, защищенностью, высокой помехоустойчивостью и др.), эта технология служит основой беспроводной инфраструктуры систем автоматики в режиме реального времени (RTLS), обеспечивает эффективную оценку наиболее важных параметров и повышает тем самым надежность и безопасность важнейших железнодорожных объектов.

Литература

- Каганов З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
- Боднар Б. Є., Капіца М. І. Сучасні методи контролю поточкового стану ізоляції тягових електричних машин локомотивів // Залізничний транспорт України. 2006. № 2. С. 22–26. ISSN 2309–821X.
- Полехин С. И. Теория связи по проводам. М. : Связьиздат, 1960. 464 с.
- Щиголов С. А., Сергеев Б. С. Анализ работы путевого датчика ДПЭП // Электротехника. 2000. № 7. С. 41–46. ISSN 0013–5860.
- Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин : учеб. пособие. Новосибирск : ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. 464 с.
- Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М. : Связь, 1967. 608 с.
- Бараш Л. Многообразие стандартов беспроводных технологий // Компьютерное обозрение. 2003. № 10. С. 379–384.
- ZigBee Alliance [Сайт]. URL: www.zigbee.org (дата обращения: 03.08.2015).
- NXP [Сайт]. URL: www.freescale.com (дата обращения: 03.08.2015).
- Діагностування електричних машин частотним методом / А. П. Разгонов та ін. : матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. С. 67–68.

References

- Kaganov Z. G. Elektricheskie tsepi s raspredelyonnymi parametrami i tsepyne skhemy [Electrical circuits with distributed parameters and ladder circuits]. M. : Energoatomizdat, 1990. 248 s.
- Bodnar B. E, Kapitsa M. I. Suchasni metodi kontrolyu potokovogo stanu izolyatsiy tyagovikh elektrichnikh mashin lokomotiviv // Zaliznichnyi transport Ukraini. 2006. № 2. S. 22–26. ISSN 2309–821X.
- Polekhin S. I. Teoriya svyazi po provodam [Wire communication theory]. M. : Svyazizdat, 1960. 464 s.
- Shchigolev S. A., Sergeev B. S. Analiz raboty putevogo datchika DPEP [Analysis of DPEP track sensor operation] // Elektrotehnika. 2000. № 7. S. 41–46. ISSN 0013–5860.
- Inkin A. I. Elektromagnitnye polya i parametry elektricheskikh mashin : ucheb. posobie [Electromagnetic fields and parameters of electrical machinery : a textbook]. Novosibirsk : OOO «Izdatelstvo YuKEA», 2002. 464 s.
- Beletskiy A. F. Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh tsepey [Fundamentals of linear electric circuit theory]. M. : Svyaz, 1967. 608 s.
- Barash L. Mnogoobrazie standartov besprovodnykh tekhnologiy [Diversity of wireless technology standards] // Kompyuternoe obozrenie. 2003. № 10. S. 379–384.
- ZigBee Alliance [Site]. URL: www.zigbee.org (date accessed: 03.08.2015).
- NXP [Site]. URL: www.freescale.com (date accessed: 03.08.2015).
- Diagnostuvannya elektrichnikh mashin chastotnim metodom [Diagnosis of electric machinery using frequency method] / A. P. Razgonov ta in. : mater. IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznichnomu transporti». D. : Vid-vo Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2011. S. 67–68.

УДК 656.2

Роман Юрьевич Упырь, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск,
Александра Игоревна Кузнецова, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск,
Пурэв Батхуяг, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск

МЕТОДИКА СВИВКИ ПРОВОЛОЧНЫХ СРЕДСТВ КРЕПЛЕНИЯ

Roman Yurievich Upyr, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Department of Management of Operation Work, Irkutsk State University of Railway Engineers (IrGUPS), Irkutsk,
Alexandra Igorevna Kuznetsova, graduate student, Department of Management of Operation Work, Irkutsk State University of Railway Engineers (IrGUPS), Irkutsk,
Purev Batkhuyag, graduate student, Department of Management of Operation Work, Irkutsk State University of Railway Engineers (IrGUPS), Irkutsk

A method for stranding wire fasteners

Аннотация

В статье изложена оригинальная методика свивки проволочных средств крепления, при помощи которой на основе использования математических моделей начальной структуры в виде ромба и эллипса можно изготавливать «настраиваемые» по структуре проволочные растяжки с изменением прочностных свойств и повышением надежности крепления. Разработан реализованный в виде программного продукта алгоритм, позволяющий определять параметры свивки проволочной растяжки при ее изготовлении и необходимое количество оборотов вращения устройства для свивки.

Ключевые слова: проволочная растяжка, крепление, свивка, груз, вагон.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-72-77

Summary

The paper proposes an original method of stranding wire fasteners which allows to produce bracing wires with «customizable structure», improved strength properties and increased fastening reliability, based on mathematical models of diamond and ellipse-shaped initial structure. An algorithm has been developed in the form of software to determine bracing wires stranding parameters during its production and the required number of rotations of stranding device.

Keywords: bracing wire, fastening, stranding, cargo, rail car.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-72-77

ВВЕДЕНИЕ

При перевозке грузов по железным дорогам особое место в системе обеспечения безопасности движения занимает надежное закрепление груза, позволяющее осуществлять его транспортировку на гарантийном плече обращения. Исследования, проведенные на гарантийном участке обращения, показали, что имеются случаи нарушения целостности средств крепления и расстройств погрузки [1].

Надежность закрепления груза в современных условиях основывается на технологии изготовления и методах расчетов, приведенных в работе [2]. В свою очередь, известно достаточно много исследований, использующих классические представления о расчете прочностных свойств средств крепления (к примеру, [3]–[7]) методами теоретической механики. Методика геометрического синтеза проволочных средств крепления рассмотрена в работе [8].

Тем не менее следует отметить, что классические методы теоретической механики и геометрического синтеза представляют собой совокупность способов построения элементов пассивной структуры [9], не учитывающих ни динамические взаимодействия и возможности настройки в проволочных средствах крепления, ни упругие взаимодействия груза и вагона.

В связи с этим представляется целесообразным развитие методов построения математических моделей, позволяющих учитывать динамику взаимодействия колебательных систем типа «колесо — вагон — груз».

1. СТРУКТУРА ПРОВОЛОЧНЫХ СРЕДСТВ КРЕПЛЕНИЯ

При рассмотрении колебательной системы, к примеру «груз — вагон», в качестве особой управляемой упругой связи (с настраиваемыми параметрами) [8, 9] можно учесть проволочные средства крепления.

В классической [2] постановке задачи изготовления проволочных средств крепления (растяжки, обвязки и т. п.) проволочный элемент (звено) представляет собой совокупность деформированных (упруго деформированных) нитей, подверженных предварительной деформации на этапе изготовления. Такая структура проволочной растяжки работает на растяжение-сжатие как жесткий стержень с малой степенью упругости [2, 3] и не имеет возможности настройки.

Если рассматривать нить проволочной растяжки не как прямой стержень, а как стержень, имеющий некоторую кривизну, может быть справедлива модель [8], учитывающая параметры, показанные на рис. 1.

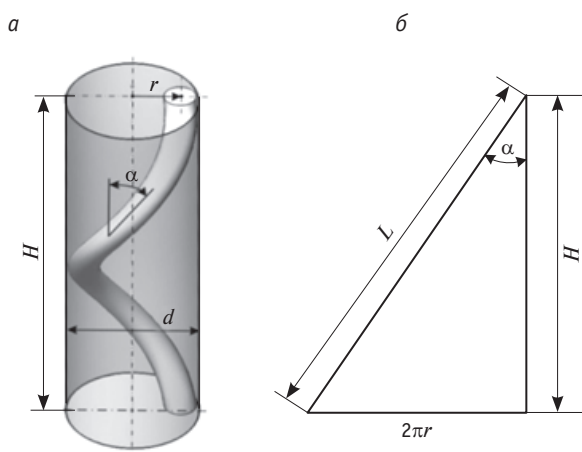


Рис. 1. Параметры свивки (а) и развертка винтовой линии (б):

d — диаметр проволочной растяжки; r , α , H — радиус, угол, и шаг свивки; $L = H/\cos\alpha = 2\pi r/\sin\alpha$ — длина винтового элемента на шаге свивки проволочной растяжки

Детальный анализ геометрической структуры проволочной растяжки и способов ее изготовления позволяет предложить альтернативные методы математического моделирования. В такой постановке задачи могут быть рассмотрены (в зависимости от степени точности определения основных параметров), к примеру, модели свивки при начальной структуре укладки проволоки в форме ромба и эллипса.

2. МЕТОДИКА СВИВКИ ПРИ НАЧАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ В ВИДЕ РОМБА

Рассмотрим случай, когда при свивке проволочных элементов крепления базовой является модель ромба, и на примере проволочной растяжки покажем возможность формирования геометрической структуры (рис. 2).

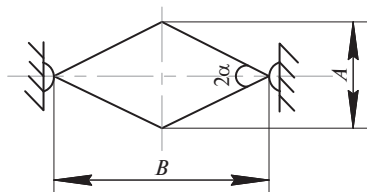


Рис. 2. Расчетная схема для формирования структуры проволочного элемента крепления

Математическую модель будем строить с учетом физической возможности формирования основных параметров.

На рис. 2 большая диагональ ромба B показывает расстояние между местом закрепления на грузе и местом закрепления на вагоне, диагональ A — начальное регулируемое расстояние между ветвями проволочного элемента крепления, определяющее длину используемой для формирования проволоки.

Найдем длину проволоки, необходимую для формирования проволочного элемента крепления, используя выражение

$$S = 2\sqrt{A^2 + B^2}, \quad (1)$$

где S — длина проволоки.

Изменением длины (количества) проволоки будем задавать параметры периметра ромба. При изменении количества нитей получим обобщенное выражение для расчета длины проволоки в проволочной растяжке:

$$S = n\sqrt{A^2 + B^2}, \quad (2)$$

где n — число нитей.

Следует отметить, что длину проволочной растяжки кроме непосредственных измерений можно определить и из теории геометрического синтеза [8]:

$$L_{\text{раст}} = B = 2Hc, \quad (3)$$

где H и c — соответственно шаг и количество шагов свивки.

Чтобы найти число шагов свивки в растяжке, разделим длину проволоки S на длину винтового элемента на шаге свивки L , с учетом того что на один шаг уходит $2Ln$ и $2H$ (как показано на рис. 3). Процесс «скрутки» проволочной растяжки осуществляется путем вращения ромба, при этом возникают две зоны свивки, равные между собой.

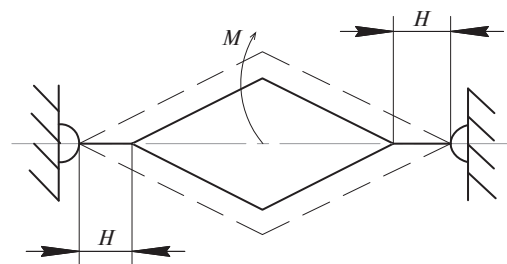


Рис. 3. Расчетная схема для определения числа шагов свивки: H — шаг свивки; M — крутящий момент

С учетом принятых соотношений получим:

$$S = c2Ln; \quad c = \frac{S}{2Ln}, \quad (4)$$

где L — длина винтового элемента на шаге свивки.

Таблица 1

Диаметр свивки в зависимости от числа нитей в растяжке

Число нитей	Изображение	Формула
2		$D_{св} = 2r_{св} = 2r_{пр}$
3		$D_{св} = 2r_{св} = \frac{4r_{пр}}{\sqrt{3}}$
4		$D_{св} = 2r_{св} = 4r_{пр}$
		$D_{св} = 2r_{св} = \frac{4r_{пр}}{\sqrt{2}}$
5		$D_{св} = 2r_{св} = 4r_{пр}$
6		$D_{св} = 2r_{св} = 4r_{пр}$
7		$D_{св} = 2r_{св} = 4r_{пр}$
8		$D_{св} = 2r_{св} = 4r_{пр}$

Из работ [1, 8] известно, что $L = \frac{2\pi r}{\sin \alpha}$, тогда

$$c = \frac{S}{2Ln} = \frac{S \sin \alpha}{2n2\pi r}. \quad (5)$$

Используя выражения (3) и (4), шаг свивки определим следующим образом:

$$H = \frac{B}{2c} = \frac{B2n2\pi r}{2S \sin \alpha} = \frac{Bn2\pi r}{S \sin \alpha}. \quad (6)$$

Из прямоугольного треугольника (см. рис. 1) $\sin \alpha$ можно выразить как

$$\sin \alpha = \frac{2\pi r}{L}, \quad (7)$$

а длину винтового элемента L как

$$L = \sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}. \quad (8)$$

Подставив (7) и (8) в (6), получим выражение для определения шага свивки:

$$H = \frac{Bn2\pi r \sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}}{S2\pi r} = \frac{Bn \sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}}{S}.$$

Произведя ряд преобразований, получим

$$H = \frac{2\pi r B}{A}. \quad (9)$$

Кроме основных характеристик c и H целесообразно определить еще один параметр — диаметр свивки, под которым понимается диаметр окружности, проходящий через центр проволок центрального слоя. Для этого можно использовать и геометрический подход [8], результаты которого приведены в табл. 1, и аналитический — с учетом формулы В. Д. Королева [10].

Диаметр проволочной растяжки можно найти из выражения

$$D_{раст} = d_i m_i, \quad (10)$$

где $D_{раст}$ — диаметр растяжки i -го слоя, мм;

d_i — диаметр проволоки i -го слоя, мм;

m_i — коэффициент свивки i -го слоя.

Для расчета коэффициента свивки i -го слоя воспользуемся формулой В. Д. Королева [10], тогда

$$m = \frac{1}{\sin \frac{180}{n} + 1}, \quad (11)$$

где n — количество проволок в слое.

Диаметр свивки определим как

$$D_{\text{св}} = D_{\text{раст}} - d_i. \quad (12)$$

Диаметр свивки равен

$$D_{\text{св}} = D_{\text{раст}} - d_i = \frac{d_i}{\sin \frac{180}{n}}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (9), получим

$$H = \frac{\pi D_{\text{св}} B}{A} = \frac{\pi d_i B}{\sin \frac{180}{n} A}. \quad (14)$$

С учетом приведенных выше выражений математическая модель проволочной растяжки при расчетной схеме в форме ромба примет вид

$$\begin{cases} H = \frac{\pi D_{\text{св}} B}{A} \\ D_{\text{св}} = \frac{d_i}{\sin \frac{180}{n}} \\ c = \frac{L_{\text{раст}}}{2H} \end{cases} \quad (15)$$

3. МЕТОДИКА СВИВКИ ПРИ НАЧАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ В ВИДЕ ЭЛЛИПСА

Рассмотрим расчетную схему размещения проволоки для формирования проволочной растяжки в форме эллипса (рис. 4).

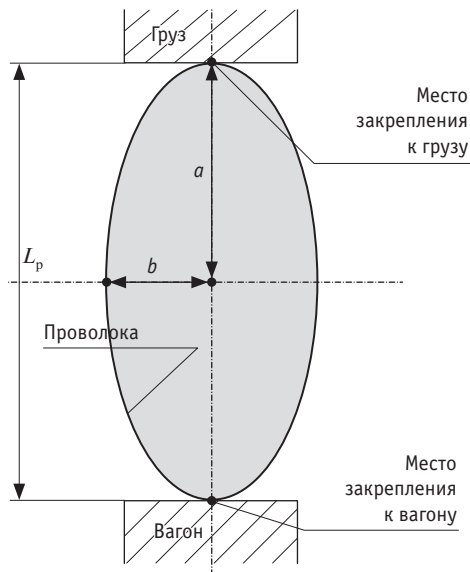


Рис. 4. Расчетная схема построения проволочной растяжки при эллипсовидной форме размещения проволоки

Учитывая методику свивки, описанную в разделе 2, определим зависимость шага свивки H от параметров намотки проволоки.

Длину проволочной растяжки L_p найдем по формуле

$$L_p = n_h H, \quad (16)$$

где n_h — число шагов свивки.

Из известных соотношений (см. рис. 4) получим

$$L_p = 2a. \quad (17)$$

Для определения числа шагов свивки в растяжке разделим половину длины одного витка обмотанной проволоки $L_{\text{пров}}$ на длину винтового элемента на шаге свивки $L_{\text{винт}}$, т. е.

$$n_h = \frac{L_{\text{пров}}}{2L_{\text{винт}}}. \quad (18)$$

Из рис. 1 известно, что $L_{\text{винт}} = \frac{2\pi r}{\sin \alpha}$, тогда

$$n_h = \frac{L_{\text{пров}} \sin \alpha}{4\pi r}. \quad (19)$$

Шаг свивки H можно выразить как

$$H = \frac{L_p}{n_h} = \frac{2a4\pi r}{L_{\text{пров}} \sin \alpha} = \frac{8\pi r a}{L_{\text{пров}} \sin \alpha}. \quad (20)$$

Из прямоугольного треугольника, изображенного на рис. 1, $\sin \alpha$ можно определить как

$$\sin \alpha = \frac{2\pi r}{L_{\text{винт}}},$$

где $L_{\text{винт}} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}$, тогда

$$H = \frac{8\pi r a}{L_{\text{пров}} \frac{2\pi r}{\sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}}} = \frac{8\pi r a \sqrt{4\pi^2 r^2 + H^2}}{2L_{\text{пров}} \pi r}. \quad (21)$$

Возведем обе части выражения (21) в квадрат и после ряда преобразований получим

$$H = \frac{8\pi r}{\sqrt{L_{\text{пров}}^2 - 16a^2}}. \quad (22)$$

При формировании растяжки может быть использовано специальное устройство для скручивания, которое устанавливается в середине скручиваемого участка, и каждый оборот приспособления для скручивания будет формировать два

шага свивки, как и при использовании модели ромба. Число оборотов можно выразить следующим образом:

$$n_{об} = \frac{L_{раст}}{2H}. \quad (23)$$

При намотке проволоки для формирования растяжки каждый виток намотки можно представить как эллипс с полуосями a и b , тогда ее длина определяется по формуле периметра эллипса:

$$L_{пров} = \pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right]. \quad (24)$$

Общая длина, необходимая для формирования растяжки, будет равна

$$L_{общ} = \frac{n}{2} L_{пров}, \quad (25)$$

где n — число проволок в формируемой растяжке.

С учетом приведенных выше выражений математическая модель проволочной растяжки при расчетной схеме в форме эллипса примет вид

$$\begin{cases} H = \frac{8a\pi r}{\sqrt{L_{пров}^2 - 16a^2}} \\ n_{об} = \frac{L_{раст}}{2H} \end{cases}. \quad (26)$$

Таким образом, предложенные модели в полной мере позволяют определить основные параметры проволочных элементов крепления. Использование той или иной конкретной модели, а точнее, ее выбор обуславливается степенью точности и детализации прикладных расчетов.

4. ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

На основе методики, рассмотренной в разделах 1–3 и в работах [1, 8, 11], разработан программный комплекс по определению основных параметров проволочных средств крепления [12].

Программа позволяет, задавая такие характеристики, как число проволок в растяжке, диаметр одной проволоки, длина и ширина элемента, рассчитывать параметры формируемой растяжки: шаг свивки, число оборотов для формирования растяжки (отображает, на сколько градусов необходимо повернуть устройство для свивки), общую длину, массу проволоки. Интерфейс программы представлен на рис. 5.

Для верификации предложенного алгоритма построения проволочных средств крепления проведен численный эксперимент по определению основных параметров проволочной растяжки. Выбраны следующие начальные условия: число проволок в растяжке — 2 нити, диаметр одной проволоки — 4 мм, длина рассматриваемого элемента растяжки (при задаваемой ширине 50 мм) — 1000 мм (рис. 6).

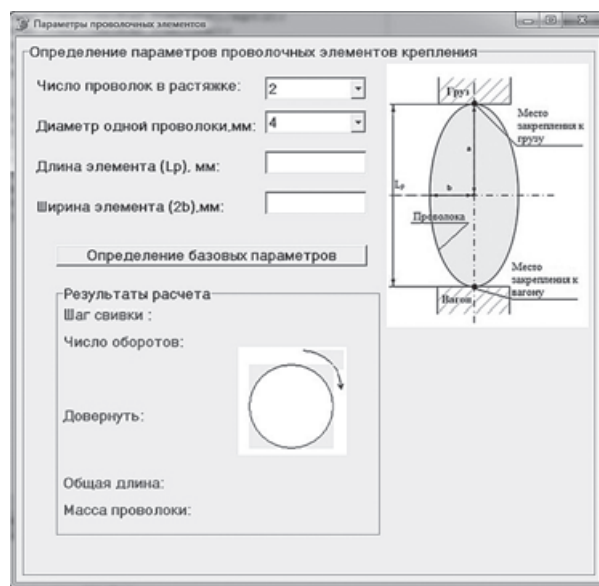


Рис. 5. Рабочее окно программы

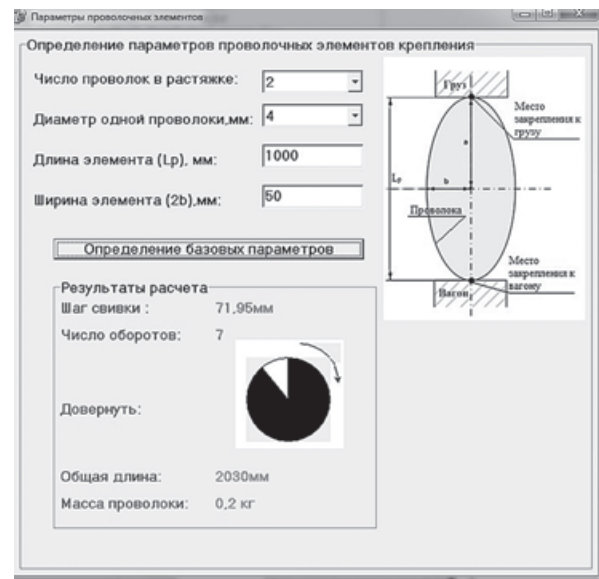


Рис. 6. Пример численного эксперимента

В результате расчетов установлено, что для формирования проволочной растяжки с учетом плотного прилегания нитей потребуется произвести 7 полных оборотов устройства для затыжки с доворотом на указанную на рис. 6 величину. При этом общая длина проволоки для изготовления растяжки составит 2030 мм.

ВЫВОДЫ

1. Использование предложенной методики позволяет надежно закреплять груз на железнодорожном подвижном составе за счет создания проволочных элементов крепления с регулируемыми параметрами.

2. Рассмотренные методики построения математических моделей дают возможность организовать процесс формирования проволочных элементов крепления по структуре в виде каната или троса с обеспечением линейного контакта проволок.

3. На основе предложенной методики проведен численный эксперимент, позволивший определить такие параметры при формировании проволочной растяжки, как число оборотов устройства для свивки, необходимая длина проволоки и ее масса.

Литература

1. Упырь Р. Ю., Кузнецова А. И., Кожевников В. А. К вопросу определения предварительного натяжения проволочных средств крепления // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2014. № 4. С. 108–115.
2. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. М. : Юридическая фирма «Юртранс», 2003. 544 с.
3. Туранов Х. Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок. Новосибирск : Наука, 2008. 375 с.
4. Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д. Расчет продольного сдвига груза цилиндрической формы и усилия в элементах крепления при вариации количества крепежных элементов // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 16–23. ISSN 1815–9400.
5. Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д. Математическое моделирование движения груза вдоль вагона при воздействии плоской системы сил // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 11–18. ISSN 1815–9400.
6. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). New York, 2013. Vol. 13. Issue X. Version 1.0. P. 7–16.
7. Туранов Х. Элементы теории и примеры расчета креплений твердотельного груза на вагоне : монография. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015.
8. Упырь Р. Ю., Кузнецова А. И., Кожевников В. А. Методика геометрического синтеза проволочных элементов крепления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 152–156. ISSN 1813–9108.
9. Упырь Р. Ю. Динамический синтез механических колебательных систем. Особенности пространственных форм соединения элементарных звеньев. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 248 с.
10. Королев В. Д. Канатное производство : учеб. пособие для металлургических техникумов. М. : Металлургия, 1980. 256 с.
11. Упырь Р. Ю., Тимофеева М. В., Родионов Е. Д. О натяжении проволочных растяжек // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 19. ISSN 0044–4448.
12. Определение параметров проволочных элементов крепления / Р. Ю. Упырь, А. И. Кузнецова, В. А. Кожевников : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ 2015614952 Рос. Федерация. № 2015611528 ; заявл. 10.03.15 ; опубл. 20.06.15.

References

1. Upyr R. Yu., Kuznetsova A. I., Kozhevnikov V. A. K voprosu opredeleniya predvaritelnogo natyazheniya provolochnykh sredstv krepleniya [On the question of definition of preliminary tension of wire fasteners] // Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhicheskiy vestnik). 2014. № 4. S. 108–115.
2. Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya грузов v vagonakh i konteynerakh [Specifications for stowage and securing of cargo in cars and containers]. M. : Yuridicheskaya firma «Yurtrans», 2003. 544 s.
3. Turanov Kh. T. Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh gruzovykh perevozok [Theoretical mechanics in freight transport problems]. Novosibirsk : Nauka, 2008. 375 s.
4. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D. Raschyot prodolnogo sdviga gruzha tsilindricheskoj formy i usiliya v elementakh krepleniya pri variatsii kolichestva krepzhenykh elementov [Calculation of cylindrical freight longitudinal shift and fastening elements tractions with variation of fasteners quantity] // Transport of the Urals. 2013. № 3 (38). S. 16–23. ISSN 1815–9400.
5. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya gruzha vdol vagona pri vozdeystvii ploskoy sistemy sil [Mathematical modeling of cargo movement along the car under impact of plane force system] // Transport of the Urals. 2013. № 4 (39). S. 11–18. ISSN 1815–9400.
6. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). New York, 2013. Vol. 13. Issue X. Version 1.0. P. 7–16.
7. Turanov Kh. Elementy teorii i primery raschyota kreplenyi tverdotelnogo gruzha na vagon : monografiya [Elements of theory and examples of calculation of solid cargo fastening in a car : a monograph]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015.
8. Upyr R. Yu., Kuznetsova A. I., Kozhevnikov V. A. Metodika geometricheskogo sinteza provolochnykh elementov krepleniya [Methods of geometric synthesis of wire fasteners] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. 2015. № 2 (46). S. 152–156. ISSN 1813–9108.
9. Upyr R. Yu. Dinamicheskiy sintez mekhanicheskikh kolebatelnykh sistem. Osobennosti prostranstvennykh form soedineniya elementarnykh zvenyev [Dynamic synthesis of mechanical vibration systems. Specifics of spatial forms of connection of elementary links]. Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 248 s.
10. Korolyov V. D. Kanatnoe proizvodstvo : ucheb. posobie dlya metallurgicheskikh tekhnikumov [Rope production : a textbook for steel industry colleges]. M. : Metallurgiya, 1980. 256 s.
11. Upyr R. Yu., Timofeeva M. V., Rodionov E. D. O natyazhenii provolochnykh rastyazhek [Tension of guy wires] // Zheleznodorozhnyy transport. 2014. № 4. S. 19. ISSN 0044–4448.
12. Opredelenie parametrov provolochnykh elementov krepleniya [Determining parameters of wire fasteners] / R. Yu. Upyr, A. I. Kuznetsova, V. A. Kozhevnikov : svidetelstvo o gos. registratsii progr. dlya EVM 2015614952 Ros. Federatsiya. № 2015611528 ; zayavl. 10.03.15 ; opubl. 20.06.15.

УДК 621.83

Андрей Александрович Свечников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара,
 Виктор Владимирович Янковский, кандидат технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара,
 Михаил Анатольевич Герасимов, лаборант кафедры «Механика и инженерная графика» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ В СРЕДЕ SOLIDWORKS

Andrey Alexandrovich Svechnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Samara State Transport University (SSTU), Samara,
 Viktor Vladimirovich Yankovskiy, PhD in Engineering, Professor, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Samara State Transport University (SSTU), Samara,
 Mikhail Anatolyevich Gerasimov, Laboratory Assistant, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Samara State Transport University (SSTU), Samara

Specifics of synthesis and analysis of kinematic diagrams of transport mechanisms in SolidWorks

Аннотация

Статья посвящена вопросам синтеза и анализа рычажных и кулачковых механизмов средствами программы SolidWorks Motion. Представлена методика кинематического анализа плоских рычажных механизмов, особенность которой состоит в том, что модель механизма строится на основе компоновки, а связи реализуются путем совпадения центров кинематических пар. Кроме того, рассмотрена методика определения профиля кулачка по заданному закону движения толкателя, ее особенность заключается в определении закона движения выходного звена вне компьютерной модели и в последующем его экспорте в твердотельную модель механизма. Законы движения звеньев механизма назначаются таким образом, чтобы был реализован метод обращенного движения.

Ключевые слова: рычажный механизм, кулачковый механизм, толкатель, кинематический анализ, скорость, ускорение, SolidWorks Motion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-78-82

Summary

The article is devoted to the issues of synthesis and analysis of lever mechanisms and cam gears using SolidWorks Motion software. A technique of kinematic analysis of plane lever mechanisms is proposed, where model of the mechanism is built based on linkage, and links are implemented by matching kinematic pairs. In addition, a method of determining cam profile using a given law of motion of pusher is considered, which determines the law of motion of the output link outside the computer model, and then exports it to the solid model of the mechanism. The laws of motion of mechanism links are assigned so that reverse motion method is implemented.

Keywords: lever mechanism, cam mechanism, pusher, kinematic analysis, velocity, acceleration, SolidWorks Motion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-78-82

Современный этап развития техники предполагает совершенствование средств автоматизированного проектирования узлов и механизмов, так как традиционное проектирование уже не удовлетворяет возросшим требованиям ни по точности спроектированных производственных процессов, ни по затрачиваемому рабочему времени. Не является исключением и транспортная отрасль. Так, «Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года («Белая книга»)» в качестве одного из научно-технологических приоритетов устанавливает «разработку и внедрение технических средств и технологий организации скоростного пассажирского, тяжеловесного движения в грузовом сообщении», а в качестве целевого направления по его осуществлению — технологию «имитационного моделирования по взаимодействию элементов конструкций в сложных технических системах подвижного состава» [1].

В настоящей статье рассмотрена методика кинематического анализа и синтеза транспортных механизмов на примере шатунно-поршневой группы и кулачково-клапанного распределительного механизма тепловозного дизеля, реализующая данную технологию. Шатунно-поршневая группа представлена в виде плоского рычажного механизма, а кулачково-клапанный распределительный механизм — в виде кулачкового. Даны рекомендации по корректности составления компьютерной модели движения механизмов в программе Motion пакета SolidWorks.

Для кинематического анализа плоских рычажных механизмов удобнее использовать не твердотельную 3D-модель, а модель на основе команды «Компоновка». Компоновка создается на плоскости, тем самым при анализе в среде Motion

автоматически назначаются три связи, запрещающие движение звеньев механизма вне плоскости построения. Звенья реализованы в программе SolidWorks с помощью эскиза и инструмента «Блок», что позволяет модели различать их. Точки крепления звеньев механизма целесообразно объединить в одно звено (один блок), традиционно называемое в теории механизмов и машин стойкой.

Кинематическая схема механизма (рис. 1) создается на основе «Компоновки» путем добавления связей к свободным звеньям. Связи во вращательной кинематической паре реализуются путем наложения центров шарниров соединяемых звеньев. Связь в поступательной кинематической паре реализуется путем наложения коллинеарности направляющей и центральной оси ползуна. Стойка при составлении модели лишена всех подвижностей.

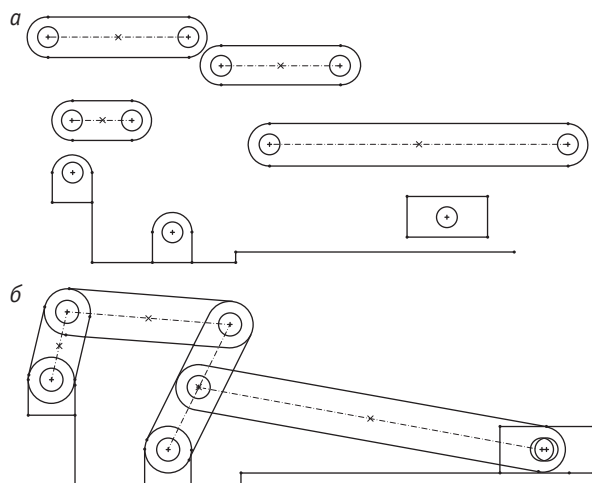


Рис. 1. Создание кинематической схемы механизма до (а) и после (б) добавления связей

Если связи наложены корректно, то у механизма останется одна степень свободы (вращение кривошипа вокруг кинематической пары «кривошип — стойка»). Если наложенные взаимосвязи обладают свойством полноты и непротиворечивости, то Motion транслирует сборку в работоспособный механизм с одной степенью подвижности, т. е. положение всех звеньев механизма определяет положение одного звена (кривошипа).

В качестве исходного параметра движения задается закон изменения угловой скорости входного звена (кривошипа). Закон движения входного звена устанавливается с помощью функции «Двигатель». При задании законов движения звеньев механизма можно сформулировать следующий принцип: каждой степени подвижности механизма нужно установить «Двигатель», определяющий закон движения какого-либо звена.

Так как работа механизма циклична, для экономии ресурсов программы и получения корректных результатов параметры расчета согласовываются с временем одного цикла работы механизма. То есть длительность расчета устанавливается равной или немного больше этого времени. Количество расчетных точек желательно определять таким образом, чтобы расчетный шаг составлял не более одного градуса угла поворота криво-

шипа. При выполнении данных условий погрешность вычислений не превысит 2 % и будет не слишком ресурсоемкой [2].

Для вывода результатов моделирования в графическую область удобно использовать стандартные функции: для построения траекторий движения точек звеньев механизма — «Путь отслеживания», для построения скоростей и ускорений точек звеньев механизма — «Скорость/ускорение».

Пример, представленный на рис. 2, свидетельствует о высокой степени точности построения траекторий движения характерных точек механизма. Можно отметить, что данный способ превосходит графический по точности построения и трудоемкости, однако уступает аналитическому в точности определения траекторий и является менее трудоемким, особенно в случаях сложного движения звеньев.

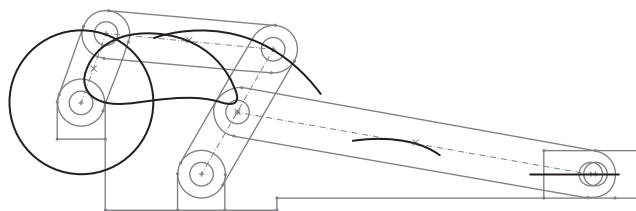


Рис. 2. Определение траекторий движения точек механизма

Построение графиков изменения скорости и ускорения точек звеньев механизма имеет следующие особенности.

Для поступательной скорости точки в качестве результирующего компонента выбирается направление оси, вдоль которой она движется, в качестве элемента — точка, для которой определяется скорость.

Для линейной вращательной скорости в качестве результирующего компонента выбирается касательное направление (радиальный компонент), в качестве элемента — точка, для которой определяется скорость.

Для угловой скорости в качестве результирующего компонента выбирается направление оси, перпендикулярное плоскости, в которой происходит движение точки, а в качестве элемента — прямая, которая вращается (ось звена), и точка, вокруг которой она вращается [3].

На рис. 3 представлен график изменения угловой скорости коромысла, где в качестве результирующего компонента выбрана ось, перпендикулярная плоскости с кинематической схемой механизма, а в качестве элементов — ось коромысла и центр шарнира, на который коромысло опирается.

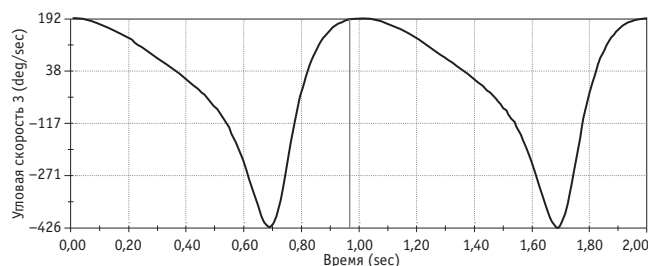


Рис. 3. Эпюра изменения угловой скорости коромысла

Для поступательного ускорения точки в качестве результирующего компонента выбирается направление оси, вдоль которой она движется, в качестве элемента — точка, для которой определяется ускорение.

Для линейного вращательного ускорения в качестве результирующего компонента выбирается касательное направление (тангенциальная составляющая) или нормальное направление (нормальная составляющая), в качестве элемента — точка, для которой определяется ускорение.

Для углового ускорения в качестве результирующего компонента выбирается направление оси, перпендикулярное плоскости, в которой происходит движение точки, а в качестве элемента — прямая, которая вращается (ось звена), и точка, вокруг которой она вращается.

Синтез плоского кулачкового механизма имеет свои особенности при построении компьютерной модели. Одна из главных состоит в том, что профиль кулачка не определен, следовательно, нет возможности назначить связи традиционным способом. Для того чтобы движения звеньев механизма соответствовали реальным движениям деталей, необходимо задать закон движения каждого звена в отдельности.

Особую трудность представляет задание закона движения выходного звена кулачкового механизма. Выходным звеном в кулачковом механизме является толкатель (клапан цилиндра). Закон движения толкателя (открывание и закрывание клапана) определяется из требуемых настроек диаграммы фаз газораспределения. Данный закон, как правило, сложный, а в программе Motion отсутствуют стандартные способы, позволяющие его устанавливать. Вследствие этого наименее трудоемким представляется задание закона движения выходного звена в табличной форме и последующий экспорт полученной таблицы в модель кулачкового механизма среды Motion.

Закон движения выходного звена в табличной форме проще всего реализовать в MS Excel, так как Excel позволяет получать числовые значения ячейки в зависимости от записанной в этой ячейке функции.

В качестве примера предположим, что закон изменения ускорения толкателя — синусоидальный. В аналитическом виде такой синусоидальный закон записывается следующим образом [3]:

$$\frac{d^2S}{d\varphi^2} = A \cdot \sin(\theta \cdot \varphi), \quad (1)$$

где $\frac{d^2S}{d\varphi^2}$ — аналог ускорения, мм;

A — амплитудное значение аналога ускорения, мм;

θ — частота изменения ускорения толкателя;

φ — угол поворота кулачка, рад.

Частота изменения ускорения толкателя определяется для каждой фазы движения толкателя в отдельности, из условия что на всю фазу движения приходится один период функции синуса, т. е.:

на фазе удаления $\theta_1 = 2\pi/\Phi_1$;

на фазе верхнего выстоя $\theta_2 = 0$;

на фазе приближения $\theta_3 = 2\pi/\Phi_3$;

на фазе нижнего выстоя $\theta_4 = 0$,

где Φ_1 и Φ_3 — углы поворота кулачка (или коленчатого вала дизеля), за которые клапан должен перейти от закрытого положения к открытому и наоборот.

Амплитудное значение аналога ускорения определяется в ходе интегрирования из условия, что ход толкателя составит H , и равно:

$$\text{на фазе удаления } A_1 = \frac{2\pi \cdot H}{\Phi_1^2};$$

$$\text{на фазе верхнего выстоя } A_2 = 0;$$

$$\text{на фазе приближения } A_3 = \frac{2\pi \cdot H}{\Phi_3^2};$$

$$\text{на фазе нижнего выстоя } A_4 = 0.$$

Полученную кусочную функцию изменения ускорения толкателя кулачкового механизма представляем в табличной форме в программе Excel (табл. 1).

Для заполнения столбца «Время расчета» используем формулу

$$t = \frac{\varphi}{\omega},$$

где φ — угол поворота кулачка, рад.

Столбец «Аналог ускорения» заполняем на основе формулы (1), а столбец «Ускорение» — с помощью формулы

$$a = \frac{d^2S}{d\varphi^2} \cdot \omega^2.$$

По результатам расчета в программе Excel график изменения ускорения толкателя примет вид, представленный на рис. 4.

Полученная нами таблица понятна для пользователя-человека, но непонятна для компьютерной программы SolidWorks Motion. Для того чтобы SolidWorks Motion понимала, что полученная нами зависимость — это зависимость ускорения толкателя от времени, необходимо сформировать отдельный файл с расширением CSV (разделители — запятые) только с двумя столбцами — времени и ускорения, причем столбец времени должен стоять первым, а заголовки должны отсутствовать.

Дальнейшее определение закона движения звеньев механизма реализуется непосредственно в среде Motion. Ограничения движения на детали механизма накладываются таким образом, чтобы шайба кулачка могла вращаться только вокруг своей оси, а толкатель свободно перемещался вдоль направляющей. Далее задается начальное положение выходного звена (т. е. минимальный радиус шайбы кулачка).

Для определения закона движения выходного звена импортируем полученную таблицу в функцию программы Motion «Линейный двигатель». Для определения закона движения кулачка воспользуемся стандартной функцией «Двигатель» и зададим постоянную угловую скорость вращения шайбы кулачка [4]. При этом длительность исследования необходимо установить равной времени одного оборота кулачка t , так как движение кулачкового механизма имеет циклический характер.

Таблица 1

Закон движения выходного звена

Фаза	Угол поворота кулачка φ , град	Угол поворота кулачка φ , рад	Время расчета t , с	Амплитуда изменения аналога ускорения A , мм	Частота изменения аналога ускорения θ	Аналог ускорения $\frac{d^2S}{d\varphi^2}$, мм	Ускорение a , мм/с ²
Фаза удаления	0			A_1	θ_1		
	1			A_1	θ_1		
	2			A_1	θ_1		
	...			A_1	θ_1		
	Φ_1			A_1	θ_1		
Фаза верхнего выстоя	$\Phi_1 + 1$			A_2	θ_2		
	...			A_2	θ_2		
	$\Phi_1 + \Phi_2$			A_2	θ_2		
Фаза приближения	$\Phi_1 + \Phi_2 + 1$			A_3	θ_3		
	...			A_3	θ_3		
	$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$			A_3	θ_3		
Фаза нижнего выстоя	$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + 1$			A_4	θ_4		
	...			A_4	θ_4		
	360		0,6	A_4	θ_4		

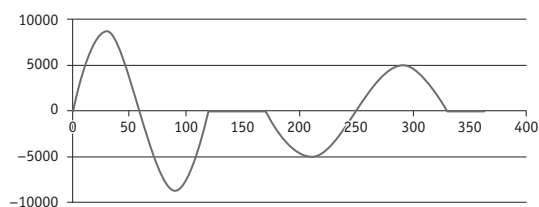


Рис. 4. График изменения ускорения толкателя, мм/с²

Наложенные подобным образом законы движения выходного звена и кулачка реализуют метод обращенного движения, т. е. рассматривается движение точки касания толкателя (коромысла) поверхности кулачка относительно шайбы кулачка. Для того чтобы отобразить траекторию, описывающую движение точки касания толкателя и кулачка относительно шайбы, необходимо воспользоваться командой «Путь отслеживания». Результатом расчета движения кулачкового механизма будет сформированный профиль кулачка (рис. 5).

Таким образом, в ходе расчетного имитационного исследования выполнен синтез и анализ транспортных механизмов на примере шатунно-поршневой группы, представленной кривошипно-ползунным механизмом, и кулачкового-клапанного распределительного механизма, представленного в виде кулачкового механизма с толкателем. Даны рекомендации по составлению математической модели плоских транспортных механизмов различных структур и различной степени сложности в программе Motion пакета SolidWorks.

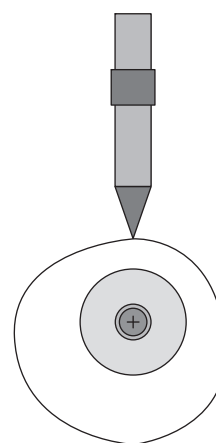


Рис. 5. Профиль кулачка

Применение данной методики на стадии проектирования и модернизации элементов конструкций в технических системах подвижного состава позволит учесть реальные кинематические условия работы транспортных механизмов и, как следствие, сократить время при их опытной доводке в эксплуатации.

Развитие предложенной методики даст возможность внедрить имитационное моделирование взаимодействия элементов конструкций в сложных технических системах подвижного состава в соответствии с «Белой книгой» ОАО «РЖД» [1].

Литература

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года («Белая книга») [Электронный ресурс]. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 11.01.2016).
2. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks. М. : ДМК Пресс, 2010. 784 с.
3. Свечников А. А., Янковский В. В. Теория механизмов и машин : лаб. практикум. Самара : СамГУПС, 2015. 78 с.
4. Свечников А. А., Асабин В. В. Имитация силового контакта в высшей кинематической паре, реализованного в среде SolidWorks // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 27–32. ISSN 1997-0722.

References

1. Strategiya nauchno-tehnicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda («Belaya kniga») [Strategy of scientific and technological development of JSC Russian Railways for the period up to 2020 and outlook up to 2025 (White Paper)]. [Electronic resource]. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (date accessed: 11.01.2016).
2. Alyamovskiy A. A. COSMOSWorks. Osnovy raschyota konstruktsey na prochnost v srede SolidWorks [Bases for strength analysis of structures in SolidWorks]. M. : DMK Press, 2010. 784 s.
3. Svechnikov A. A., Yankovskiy V. V. Teoriya mekhanizmov i mashin : lab. praktikum [Theory of mechanisms and machines : laboratory workshop]. Samara : SamGUPS, 2015. 78 s.
4. Svechnikov A. A., Asabin V. V. Imitatsiya silovogo kontakta v vysshey kinematicheskoy pare, realizovannogo v srede SolidWorks [Simulation of power contact in kinematic pairs of higher grade implemented in SolidWorks environment] // Vestnik transporta Povolzhya. 2014. № 4 (46). S. 27–32. ISSN 1997-0722.

УДК 629.463.3

Игорь Валентинович Плотников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва,
Виктор Михайлович Меланин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва,
Александр Михайлович Денисов, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ПРОДЛЕНИИ СРОКА ИХ СЛУЖБЫ

Igor Valentinovich Plotnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Rail Cars and Car Facilities, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow,
Viktor Mikhaylovich Melanin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Rail Cars and Car Facilities, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow,
Alexander Mikhaylovich Denisov, graduate student, Department of Rail Cars and Car Facilities, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow

A method to determine residual life of freight cars when extending their service life

Аннотация

Предложена методика, основанная на использовании энергетического подхода, принципов Лагранжа или Кастильяно и позволяющая применить метод конечных элементов к оценке остаточного ресурса грузовых вагонов. С ее помощью по фактическому техническому состоянию вагонов можно определить остаточный срок их службы для принятия обоснованных решений о его продлении.

Ключевые слова: вагон, срок службы, матрица старения конструкции, потенциальная энергия, принцип Лагранжа, остаточный ресурс, метод конечных элементов, матрица жесткости.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-83-85

Summary

A technique is proposed, which is based on the use of energy approach, Lagrange and Castigliano principles, and allows to apply finite element method to evaluation of residual life of freight cars. It allows to determine the remaining service life of freight cars based on their actual technical condition and make informed decisions about extension of service life.

Keywords: rail car, service life, matrix aging of structure, potential energy, Lagrange principle, residual life, finite element method, stiffness matrix.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-83-85

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В настоящее время на территории Российской Федерации около 300 тыс. вагонов имеют срок службы, превышающий установленные нормативы. До 2020 г. в связи с окончанием назначенного срока службы ожидается выбытие еще более 370 тыс. вагонов.

Таким образом, проблема продления срока службы и связанная с этим задача определения остаточного ресурса подвижного состава представляются актуальными.

В качестве способа теоретической оценки остаточного срока службы предлагается методика, основанная на применении вариационных принципов механики [1, 2].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В основу построения методики положено простое умозаключение: исправный вагон обладает потенциальной энергией

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \left[1 - \frac{\sigma_{III_i}}{\sigma_{-li}} \right] \Theta_i, \quad (1)$$

где N — количество узлов вагона;

i — индекс узла вагона;

σ_{III_i} — напряжения в узле вагона по третьему расчетному режиму [3];

σ_{-li} — фактический предел выносливости материала узла вагона;

Θ_i — энергия узла вагона.

С течением времени эта энергия убывает, и ее можно записать выражением

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \left(\left[1 - \frac{\sigma_{III_i}}{\sigma_{-I_i}} \right] \cdot \Theta_i - t \cdot \Theta'_i \right). \quad (2)$$

К выражению энергии применим принцип Лагранжа $\partial \Theta / \partial w_i = 0$ или принцип Кастильяно $\partial \Theta / \partial P_i = 0$, где w_i — перемещения узла вагона, а P_i — силы, действующие на узел. В первом случае получаем уравнения метода перемещений, матрицу жесткости и матрицу старения конструкции, во втором — уравнения метода сил и матрицы податливости конструкции. Из этих уравнений можно найти t — остаточный срок службы вагона, соответствующий минимуму потенциальной энергии.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Остаточный ресурс вагонов $t_{\text{ост}}$ предлагается определять по формуле

$$\det \left(\left[1 - \frac{\sigma_{III_i}}{[\sigma_{III_i}]} \right] \cdot R_k - t_{\text{ост}} \cdot S \right) = 0, \quad (3)$$

где \det — определитель матрицы;

$[\sigma_{III_i}]$ — допускаемые напряжения по третьему расчетному режиму [3];

R_k — матрица жесткости вагона при списании его из парка;

S — матрица старения конструкции.

Расчет осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе определяются напряжения σ_{III_i} для каждого конечного элемента. Для этого решается система уравнений

$$R_k \cdot w = P_{III}, \quad (4)$$

где w — вектор узловых перемещений конструкции;

P_{III} — вектор нагрузок для третьего расчетного режима.

Найденные перемещения используются для вычисления деформаций и напряжений σ_{III_i} . Если напряжения σ_{III_i} превышают допускаемые, то продлевать срок службы такой конструкции нельзя.

На втором этапе производится сборка матрицы

$$\left[1 - \frac{\sigma_{III_i}}{[\sigma_{III_i}]} \right] \cdot R_k. \quad (5)$$

Множитель $\left[1 - \frac{\sigma_{III_i}}{[\sigma_{III_i}]} \right]$ определяется для каждого элемента и будет зависеть от материала элемента конструкции.

На третьем этапе определяется матрица старения конструкции. Приближенно ее можно найти по формуле

$$S = \frac{R_n - R_k}{T}, \quad (6)$$

где R_n — матрица жесткости вагона при его вводе в эксплуатацию;

T — срок службы вагона.

На четвертом этапе оценивается остаточный ресурс вагона $t_{\text{ост}}$. Для этого нужно найти собственные числа матрицы $S^{-1}R$. Следует учесть, что $S^{-1}R$ — нижняя треугольная матрица и ее собственные числа располагаются на диагонали.

Пример. Предположим, что конструкция вагона, имеющего назначенный срок службы 32 года, изготовлена из материала с допускаемыми напряжениями $[\sigma_{III}] = 110$ МПа, и пусть $\sigma_{III} = 100$ МПа.

Матрица жесткости конструкции при изготовлении вагона будет иметь вид

$$R_n = \begin{bmatrix} 2,4 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \text{ кг/см.}$$

Через 32 года эксплуатации вагона ($T = 32$) матрица жесткости примет вид

$$R_k = \begin{bmatrix} 1,5 & -0,5 & 0 \\ -0,5 & 1,1 & -0,6 \\ 0 & -0,6 & 0,6 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \text{ кг/см.}$$

Тогда матрица старения конструкции будет представлена выражением

$$S = \frac{R_n - R_k}{T} = \begin{bmatrix} 2,813 & -1,563 & 0 \\ -1,563 & 2,813 & -1,25 \\ 0 & -1,25 & 1,25 \end{bmatrix} \cdot 10^5 \text{ кг/см} \cdot \text{год.}$$

Собственные числа, характеризующие остаточный ресурс вагона, примут значения

$$\text{eigenvals} \left(S^{-1} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_{III}}{[\sigma_{III}]} \right] \cdot R_k \right) = \begin{bmatrix} 7,273 \\ 2,909 \\ 4,364 \end{bmatrix}.$$

Наименьшее из собственных чисел соответствует остаточному сроку службы вагона. В нашем случае он равен 2,909 года.

Следует иметь в виду, что при умножении матриц собственные числа располагаются на диагонали:

$$S^{-1} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_{III}}{[\sigma_{III}]} \right] \cdot R_k = \begin{bmatrix} 7,273 & 0 & 0 \\ 4,364 & 2,909 & 0 \\ 4,364 & -1,455 & 4,364 \end{bmatrix}.$$

В данной формуле приходится обращать матрицу старения, а ее определитель может быть равен нулю или близок к нему. В этом случае целесообразно использовать другую формулу оценки остаточного срока службы:

$$\frac{1}{\left(\left[1 - \frac{\sigma_{III}}{\sigma_{-1}} \right] \cdot R_k \right)^{-1}} \cdot S = \begin{bmatrix} 7,273 & 0 & 0 \\ 4,364 & 2,909 & 0 \\ 4,364 & -1.455 & 4,364 \end{bmatrix}.$$

Здесь приходится обращать матрицу жесткости конструкции, а ее определитель отличен от нуля (при учете всех граничных условий). Данная формула численно устойчивее.

Литература

1. Меланин В. М. Удар колеса о рельс: нагрузки и деформации // Мир транспорта. 2010. № 3. С. 20–25. ISSN 1992–3252.
2. Коржин С. Н., Меланин В. М. Применение метода конечных элементов для анализа напряжений в клиновых гасителях колебаний : сб. тез., докл. 3-й науч.-техн. конф. «Подвижной состав 21 века: Идеи, требования, проекты». СПб. : ПГУПС, 2003. С. 198–201.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосВНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 320 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика оценки остаточного ресурса вагонов, основанная на вариационных принципах механики. Она позволяет на основе фактического технического состояния вагонов определять их остаточный срок службы, что важно для принятия обоснованных решений о возможности его продления, а также учесть старение материала, макро- и микротрещины в конструкции.

References

1. Melanin V. M. Udar kolesa o rels: nagruzki i deformatsii [Wheel-rail impact: loads and deformations] // Mir transporta. 2010. № 3. S. 20–25. ISSN 1992-3252.
2. Korzhin S. N., Melanin V. M. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya analiza napryazheniy v klinovykh gasitelyakh kolebaniy [Application of finite element method for stress analysis in V-shaped dampers] : sb. tez., dokl. 3-y nauch.-tekhn. konf. «Podvizhnoy sostav 21 veka: Idei, trebovaniya, proekty». SPb. : PGUPS, 2003. S. 198–201.
3. Normy dlya raschyota i projektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Rules for the calculation and design of rail cars of the Ministry of Railways of the Russian Federation for 1520 mm gauge railways (non-self propelled)]. M. : GosVNIIV–VNIIZhT, 1996. 320 s.

УДК 629.4.027.2

Марат Иванович Глушко, доктор технических наук, Екатеринбург,
Надежда Григорьевна Фетисова, старший преподаватель кафедры «Электрическая тяга»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Артем Ражапович Галиуллин, магистрант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),
Екатеринбург

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗОВ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Marat Ivanovich Glushko, DSc in Engineering, Ekaterinburg,
Nadezhda Grigorievna Fetisova, Senior Lecturer, Department of Electric Traction,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Artyom Razhapovich Galiullin, graduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Brake condition monitoring in multiple unit trains

Аннотация

В статье рассматривается новая система дистанционного контроля состояния тормозов поезда. Ее применение позволит машинисту проводить полное опробование тормозов в отсутствие помощника, контролировать их действие в пути следования, исключить использование в схеме контроля блок-реле и его контактов, отказ которых приводит к ложному сигналу неисправности ЭПТ.

Ключевые слова: пневмоэлектрическое реле давления, дистанционный контроль, полное опробование тормозов, реле выхода штока, тормозной цилиндр.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-86-87

Summary

The article describes the new remote condition monitoring system for train brakes. Its use will enable the operator to carry out full testing of brakes without an assistant, to monitor their operation en route, to abandon the use of block relay and its contacts in the control circuit, whose failure leads to false malfunction alarm of EPB.

Keywords: pneumoelectric pressure switch, remote control, complete brake testing, push rod relay, brake cylinder.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-86-87

За последние годы накоплен определенный опыт вождения одним машинистом маневровых, хозяйственных и пассажирских поездов. С другой стороны, внедрение такой новой и прогрессивной формы обслуживания привело к ряду проблем в работе машинистов пассажирского движения в одно лицо и, как следствие, вызвало необходимость в оснащении локомотивов едиными автоматизированными системами безопасности движения [1].

В связи с этим роль тормозных устройств как средства безопасности и контроля существенно возрастает. Однако внимание к условиям обслуживания и совершенствованию оборудования уделяется только в отношении локомотивов. Вместе с тем при выборе пилотного варианта необходимо анализировать работу машиниста при ведении различных поездов — грузовых, пассажирских и моторвагонных.

Следует принимать во внимание и физиологическое состояние оператора. В частности, машинист не должен испытывать чувства одиночества в кабине управления, однако в эксплуатируемых сегодня пассажирских поездах во время движения невозможно перейти в локомотив даже из вагона. Или, например, при управлении локомотивом по системе многих единиц (СМЕ) столкновение грузовых поездов на перегоне Ерал — Симская в августе 2011 г. произошло из-за того, что бригада не смогла пройти в кабину второго локомотива. Для предотвращения подобных ситуаций следует обеспечить свободный переход при смене кабины управления и по возможности — доступ в салон пассажирского вагона. Только в моторвагонных поездах машинист имеет доступ в салон любого вагона и может рассчитывать на помощь со стороны дублера, который находится в поезде и в штатном режиме исполняет обязанности охранника или кассира-контролера пассажирской компании. Поэтому регулярное обслуживание поезда одним машинистом следует начинать именно с моторвагонного подвижного состава (МВПС).

Согласно действующим правилам технического обслуживания тормозного оборудования МВПС, после отстоя поезда локомотивная бригада производит полное опробование тормозов каждого вагона с проверкой их действия на торможение и отпуск. Однако применяемая на электропоездах система дистанционного контроля с замыкающими контактами датчика давления в тормозном цилиндре не позволяет контролировать срабатывание всех тормозов в поезде [2].

Предлагаемая нами система дистанционного контроля состояния тормозов поезда основана на принципе «все тормоза сработали, все тормоза отпустили». На рис. 1 представлена схема цепи контроля состояния тормозов поезда, оборудованного ЭПТ, с обозначением проводов цепи управления. Контроль осуществляется по наличию давления в тормозном цилиндре (ТЦ) и выходу штока, возможен контроль только по давлению в ТЦ. В кабине машиниста расположены индикаторы состояния тормозов поезда — «Т» (торможение) и «О» (отпуск), на тормозных цилиндрах вагонов установлены пневмоэлектрическое реле давления в ТЦ 0,04 (0,04 — давление срабатывания реле, МПа) и реле выхода штока с переключающими контактами [3]. При полном отпуске тормозов поезда, как представлено на рис. 1, в кабине горит индикатор «О», в состоянии «перекрыша» после торможения при полном срабатывании тормозов поезда горит индикатор «Т»; при наличии в поезде неисправных тормозов в кабине машиниста горят оба световых индикатора. Если ручка крана машиниста находится в поездном положении, значит, в поезде не все тормоза отпустили, если в положении перекрыши после торможения — то не все тормоза пришли в действие или некоторые отпустили. Для выявления неисправных приборов необходимо выполнить торможение, пройти по составу и по индикаторам «ТВ» каждого вагона определить состояние тормозов: при отпущенном тормозе индикатор «ТВ» не горит. В конечном счете такой дистанцион-

ный контроль состояния тормозов позволит машинисту проводить полное опробование тормозов электропоезда при отсутствии помощника, контролировать действие тормозов в пути следования, определять открытие стоп-крана и разрыв поезда.

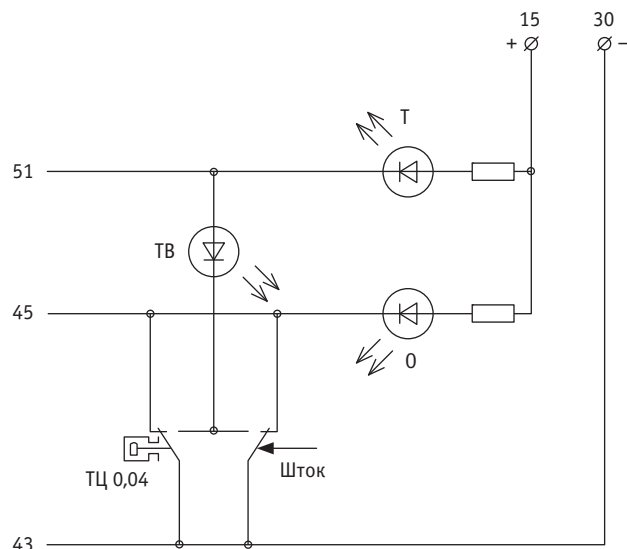


Рис. 1. Схема цепи контроля состояния тормозов электропоезда

Следует отметить, что внедрение новой технологии требует соответствующего опыта вождения и возможности дублировать функции машиниста работниками смежных профессий, обслуживающими поезд. В этом смысле ориентирование на МВПС свидетельствует о квалифицированном подходе к решению проблемы.

Литература

1. Акулов А. П. Кто поедет в одно лицо // Локомотив. 2008. № 1. С. 6–8. ISSN 0869–8147.
2. Электропневматические тормоза / Н. А. Албегов, В. К. Успенский, М. Д. Фокин и др. ; 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1964. 195 с.
3. Автотормозное и пневматическое оборудование подвижного состава рельсового транспорта. Каталог комплектующего оборудования. М. : АСТО, 2008. 45 с.

References

1. Akulov A. P. Kto poedet v odno litso [Who is going to drive alone] // Lokomotiv. 2008. № 1. S. 6–8. ISSN 0869-8147.
2. Elektropnevmaticheskie tormoza [Electro-pneumatic brakes] / N. A. Albegov, V. K. Uspenskiy, M. D. Fokin i dr. ; 3-e izd., pererab. i dop. M. : Transport, 1964. 195 s.
3. Avtotormoznoe i pnevmaticheskoe oborudovanie podvizhnogo sostava relsovogo transporta. Katalog komplektuyushchego oborudovaniya [Automatic brakes and pneumatic equipment of railway rolling stock. Standard equipment catalog]. M. : ASTO, 2008. 45 s.

УДК 621.316.722:621.331.3.024

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Леонид Александрович Фролов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Андрей Николаевич Штин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА 12-ПУЛЬСОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА С ПОФАЗНЫМ РПН ТРАНСФОРМАТОРА

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Leonid Alexandrovich Frolov, Senior Lecturer, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Andrey Nikolayevich Shtin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Calculating the average rectified no-load voltage of 12-pulse converter unit with single-phase OLTC

Аннотация

Определены четыре режима работы 12-пульсового преобразовательного агрегата с пофазным РПН, трансформатор которого имеет первичную обмотку, состоящую из двух последовательно включенных обмоток, и две вентильные обмотки, соединенные соответственно в звезду и треугольник.

Рассмотрено, как меняется напряжение выпрямительных мостов, подключенных к вентильным обмоткам. Построены временные и векторные диаграммы напряжений мостов и вентильных обмоток. Выявлено, что выпрямительные мосты, подключенные к вентильным обмоткам «звезда» и «треугольник», при пофазном регулировании ведут себя по-разному. Получены аналитические выражения для расчета среднего значения как каждого моста в отдельности, так и выпрямленного напряжения холостого хода всего 12-пульсового регулируемого преобразовательного агрегата.

Правильность разработанной методики подтверждена на физической модели преобразовательного агрегата с трансформатором мощностью 30 кВА.

Ключевые слова: обмотка трансформатора, пофазное регулирование, режим работы, выпрямленное напряжение, линейное напряжение, диапазон регулирования.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-88-92

Summary

Four operation modes of a 12-pulse converter unit with single-phase OLTC have been determined, where transformer has a primary winding consisting of two windings connected in series, and two valveside windings connected in star and triangle respectively.

The change of voltage of rectifier bridges connected to valveside windings is studied. Time and vector voltage diagrams of bridges and valveside windings are drawn. It is established that rectifier bridges connected to «star» and «triangle» valveside windings behave differently with single-phase regulation. Analytical expressions have been obtained to calculate average voltage of every single bridge and rectified no-load voltage of the entire 12-pulse controlled converter unit.

The validity of the developed method is confirmed on a physical model of converter unit with 30 kVA transformer.

Keywords: transformer winding, single phase regulation, operation mode, rectified voltage, linear voltage, control range.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-88-92

Первичная обмотка трансформатора (рис. 1) состоит из последовательно включенных сетевой (СО) и регулировочной (РО) обмоток. К РО подключены тиристорные ключи в виде замыкающих контактов коммутационного устройства, обеспечивающие в фазах трансформатора возможность одновременного или поочередного подключения и отключения витков w_α РО к виткам w_β СО [1–4].

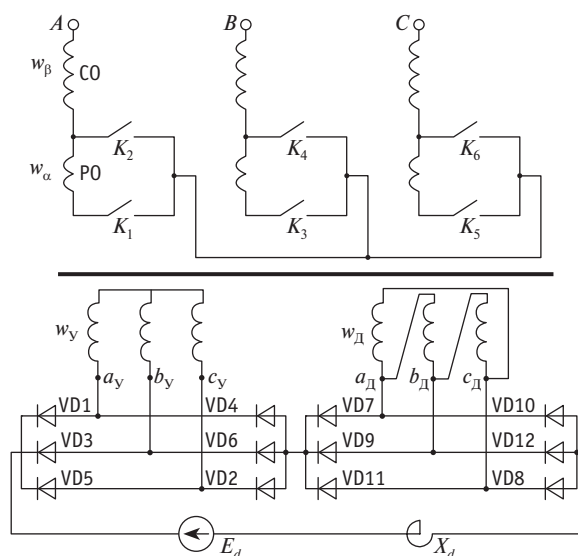


Рис. 1. Схема 12-пульсового преобразовательного агрегата с одноступенчатым РПН трансформатора

При одновременном переключении витков Р0, осуществляемом системой автоматического регулирования (САР), реализуется релейный способ регулирования напряжения, при очередном — пофазный.

В настоящей статье рассматривается пофазный способ регулирования, в котором можно выделить 4 режима.

Режим 1 — замкнуты ключи K_1, K_3, K_5 , а ключи K_2, K_4, K_6 разомкнуты. Напряжение холостого хода преобразовательного агрегата минимальное — U_{a01} .

Режим 2 — замкнуты ключи K_2, K_3, K_5 , а ключи K_1, K_4, K_6 разомкнуты. Напряжение на выходе агрегата повышается и имеет первое промежуточное значение — U_{a02} .

Режим 3 — замкнуты ключи K_2, K_4, K_5 , а ключи K_1, K_3, K_6 разомкнуты. Напряжение на выходе агрегата еще больше повышается и имеет второе промежуточное значение — U_{a03} .

Режим 4 — замкнуты ключи K_2, K_4, K_6 , а ключи K_1, K_3, K_5 разомкнуты. Напряжение на выходе агрегата максимальное — U_{a04} .

Рассмотрим, как будет меняться выпрямленное напряжение каждого выпрямительного моста (ВМ) по отдельности.

На рис. 2 изображено выпрямленное напряжение выпрямительного моста, подключенного к вентильной обмотке, соединенной в звезду (ВМ «У»), соответствующее работе агрегата в режимах 1 и 4, на рис. 3 — в режиме 2, на рис. 4 — в режиме 3.

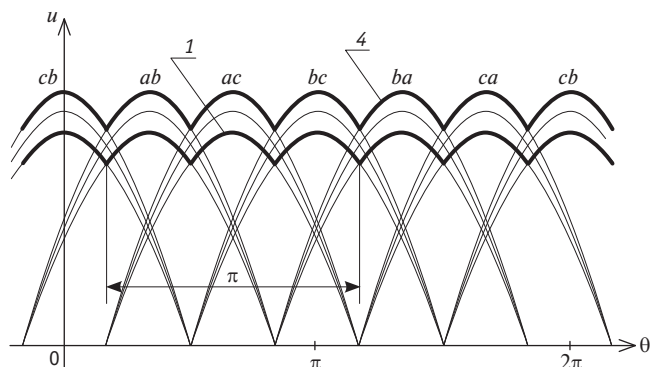


Рис. 2. Выпрямленное напряжение ВМ «У», соответствующее работе агрегата в режимах 1 (1) и 4 (4)

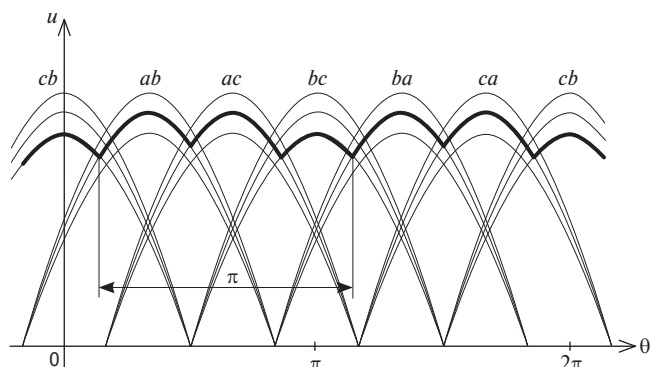


Рис. 3. Выпрямленное напряжение ВМ «У», соответствующее работе агрегата в режиме 2

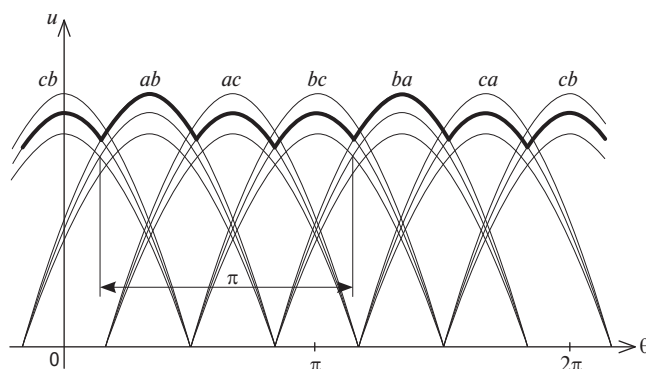


Рис. 4. Выпрямленное напряжение ВМ «У», соответствующее работе агрегата в режиме 3

Из рис. 2–4 видно, что для определения напряжения ВМ «У» достаточно рассмотреть кривую выпрямленного напряжения на интервале π . На этом интервале мгновенное значение напряжения ВМ «У» формируется только тремя линейными напряжениями вентильной обмотки, соединенной в звезду (В0 «У»), т. е. u_{ab}, u_{ac}, u_{bc} . Поэтому, чтобы определить среднее значение напряжения ВМ «У», достаточно получить выражения для этих напряжений.

На рис. 5 приведены векторные диаграммы напряжений В0 «У», соответствующие вышеуказанным режимам работы агрегата, жирными линиями выделены векторы рассматриваемых линейных напряжений.

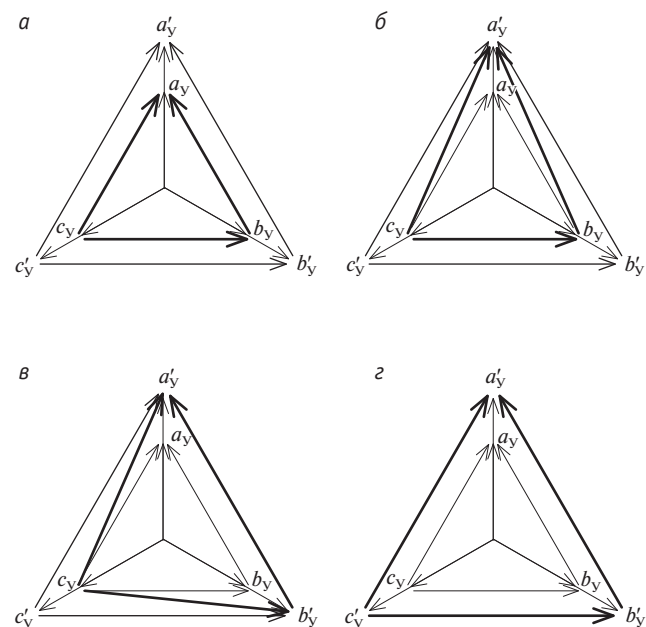


Рис. 5. Векторные диаграммы напряжений В0 «У» для различных режимов работы 12 ПВ:

а — режим 1; б — режим 2; в — режим 3; г — режим 4

Как видно из рис. 5, чтобы найти напряжение ВМ «У», необходимо определить действующие значения трех линейных напряжений.

Первое — минимальное линейное напряжение, представляющее собой разность двух минимальных фазных напряжений (например, $u_{bc} = u_b - u_c$ см. рис. 5а). Его действующее значение обозначим как $U_{2\text{ЛМІНУ}}$.

Второе — среднее линейное напряжение, т. е. разность максимального и минимального фазных напряжений (например, $u_{a'b} = u_{a'} - u_{b'}$ см. рис. 5б), действующее значение которого обозначим $U_{2\text{ЛМІДУ}}$.

Третье — максимальное линейное напряжение, т. е. разность двух максимальных фазных напряжений (например, $u_{a'c'} = u_{a'} - u_{c'}$ см. рис. 5з), действующее значение которого обозначим $U_{2\text{ЛМАХУ}}$.

Пользуясь рис. 2–5, получим действующие значения этих напряжений:

$$\begin{aligned} U_{2\text{ЛМІНУ}} &= U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3}; \\ U_{2\text{ЛМІДУ}} &= U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \cdot q; \\ U_{2\text{ЛМАХУ}} &= U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \cdot (1+d), \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{2\text{Л}*} = \frac{U_{1\text{Л}}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{w_\beta} \cdot \frac{1}{1+d}$ — базисное действующее значение

вторичного линейного напряжения;

$U_{1\text{Л}}$ — действующее значение линейного напряжения СО;

w_β — число витков СО (см. рис. 1);

$d = \frac{w_\alpha}{w_\beta}$ — диапазон регулирования;

w_α — число витков РО (см. рис. 1);

w_y — число витков ВО «У» (см. рис. 1);

$q = \sqrt{1+d+\frac{d^2}{3}}$ — коэффициент регулирования.

Для определения среднего значения выпрямленного напряжения каждой пульсации за период $\pi/3$ (см. рис. 2–4) воспользуемся известной формулой

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2\text{Л}}. \quad (2)$$

Соответственно среднее значение выпрямленного напряжения трех пульсаций за период π (см. рис. 2–4) можно найти по выражению

$$U_{d0} = \frac{U_{d0ab} + U_{d0ac} + U_{d0bc}}{3}. \quad (3)$$

Воспользовавшись (1) и (3), запишем выражения, позволяющие определить средние значения выпрямленного напряжения ВМ «У» для четырех режимов работы регулируемого агрегата:

$$\begin{aligned} U_{d01\text{У}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1+1+1}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{d02\text{У}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{q+q+1}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} \right); \\ U_{d03\text{У}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1+d+q+q}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} \right); \\ U_{d04\text{У}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1+d+1+d+1+d}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{Л}*} \cdot w_y \cdot \sqrt{3} (1+d). \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что среднее значение выпрямленного напряжения ВМ «У» при переходе регулируемого агрегата из режима 1 в режим 4 изменяется при каждом переходе из одного режима в другой, т. е. три раза.

Теперь определим средние значения выпрямленного напряжения ВМ, подключенного к вентильной обмотке, соединенной в треугольник (ВМ «Д»).

На рис. 6 приведены векторные диаграммы напряжений ВО «Д», соответствующие вышеуказанным режимам работы агрегата, жирными линиями выделены векторы рассматриваемых линейных напряжений.

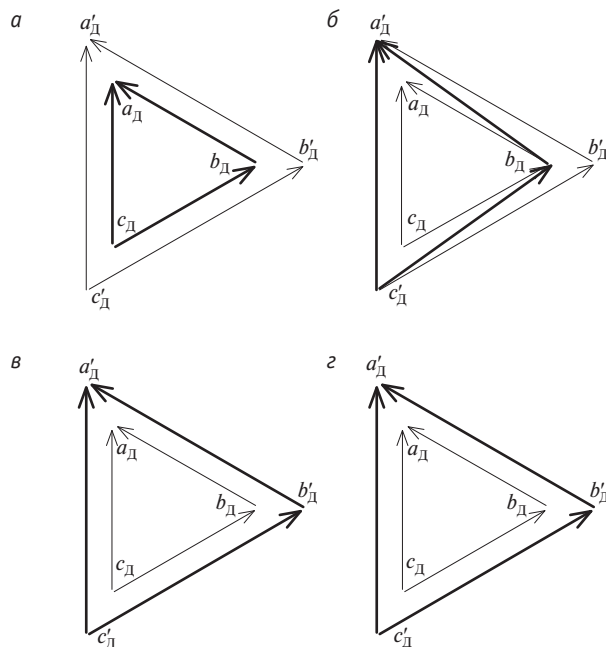


Рис. 6. Векторные диаграммы напряжений ВО «Д» для различных режимов работы агрегата:

а — режим 1; б — режим 2; в — режим 3; г — режим 4

Как видно из рис. 6, чтобы найти напряжение ВМ «Д», необходимо, как и в случае с ВМ «У», определить действующие значения трех линейных напряжений.

Первое — минимальное линейное напряжение, которое одновременно является напряжением одной из фаз (например, $u_{bc} = -u_{cr}$ см. рис. 6а), его действующее значение обозначим $U_{2Л\text{МИНД}}$.

Второе — среднее линейное напряжение, возникающее в двух фазах, когда повышается напряжение в третьей фазе (например, $u_{a'b'}$ см. рис. 6б), его действующее значение обозначим как $U_{2Л\text{МИД}}$.

Третье — максимальное линейное напряжение, которое одновременно является напряжением одной из фаз (например, $u_{a'c'} = u_{ar}$ см. рис. 6б, в, г), его действующее значение обозначим $U_{2Л\text{МАХД}}$.

Пользуясь рис. 1–4 и 6, получим действующие значения этих напряжений:

$$\begin{aligned} U_{2Л\text{МИНД}} &= U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}}; \\ U_{2Л\text{МИД}} &= U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \cdot q; \\ U_{2Л\text{МАХД}} &= U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \cdot (1+d), \end{aligned} \quad (5)$$

где $w_{\text{Д}}$ — число витков ВО «Д» (см. рис. 1).

Из рис. 6 следует, что линейные напряжения ВО «Д» изменяются:

в режиме 1 так же, как и линейные напряжения ВО «У» в режиме 1;

в режиме 2 так же, как и линейные напряжения ВО «У» в режиме 3;

в режиме 3 так же, как и линейные напряжения ВО «У» в режиме 4;

в режиме 4 так же, как и линейные напряжения ВО «У» в режиме 4.

Воспользовавшись (3) и (5), запишем выражения, позволяющие определить средние значения выпрямленного напряжения ВМ «Д» для четырех режимов работы регулируемого агрегата:

$$\begin{aligned} U_{d01\text{Д}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \left(\frac{1+1+1}{3} \right) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}}; \\ U_{d02\text{Д}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \left(\frac{q+1+d+q}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} \right); \\ U_{d03\text{Д}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \left(\frac{1+q+1+q+1+q}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} (1+d); \\ U_{d04\text{Д}} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} \left(\frac{1+q+1+q+1+q}{3} \right) = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{Д}} (1+d). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что среднее значение выпрямленного напряжения ВМ «Д» при переходе регулируемого агрегата из режима 1 в режим 4 изменяются только

два раза — при переходе из режима 1 в режим 2 и из режима 2 в режим 3. При переходе из режима 3 в режим 4 напряжение не меняется.

Запишем выражения для определения средних значений выпрямленного напряжения всего регулируемого агрегата с выпрямительным блоком последовательного типа (см. рис. 1). На основании (4) и (6) получим:

$$\begin{aligned} U_{d01} &= U_{d01\text{У}} + U_{d01\text{Д}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot (w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} + w_{\text{Д}}); \\ U_{d02} &= U_{d02\text{У}} + U_{d02\text{Д}} = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot \left[w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} \right) + w_{\text{Д}} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} \right) \right]; \\ U_{d03} &= U_{d03\text{У}} + U_{d03\text{Д}} = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot \left[w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} \right) + w_{\text{Д}} (1+d) \right]; \\ U_{d04} &= U_{d04\text{У}} + U_{d04\text{Д}} = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot \left[w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} (1+d) + w_{\text{Д}} (1+d) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Если принять, что $w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} = w_{\text{Д}}$ и $\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2Л*} \cdot w_{\text{У}} \cdot \sqrt{3} = \frac{1}{2}$,

то (7) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{d01*} &= \frac{1}{2} (1+1) = 1; \\ U_{d02*} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} \right) = \frac{2+4q+d}{6}; \\ U_{d03*} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{2q}{3} + \frac{d}{3} + 1+d \right) = \frac{2+q+2d}{3}; \\ U_{d04*} &= \frac{1}{2} (1+d+1+d) = 1+d. \end{aligned} \quad (8)$$

По предложенной методике с исходными значениями $U_{d01} = 186$ В и $d = 0,1$ выполнен расчет средних значений выпрямленного напряжения холостого хода преобразовательного агрегата с трансформатором мощностью 30 кВА, в котором применено пофазное регулирование напряжения. На физической модели указанного преобразовательного агрегата получены экспериментальные данные, сравнение которых с расчетными (табл. 1) показывает, что предложенная методика позволяет определить выпрямленное напряжение холостого хода преобразовательных агрегатов при пофазном регулировании РПН трансформатора.

Таблица 1

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных

Режим	Расчет, В	Эксперимент, В	Погрешность, %
1	186	186	0
2	195,3	194	0,67
3	201,3	201	0,15
4	204,6	204	0,29

Литература

1. Аржанников Б. А., Фролов Л. А., Штин А. Н. Оценка мощности тиристорных устройств переключения отводов обмотки трансформатора // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 129–132. ISSN 1815–9400.
2. Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 207 с.
3. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. 258 с.
4. Набойченко И. О., Аржанников Б. А., Сергеев Б. С. Электроснабжение устройств и систем автоматики, телемеханики и связи // Железнодорожный транспорт. 2004. № 6. С. 48–49. ISSN 0044–4448.

References

1. Arzhannikov B. A., Frolov L. A., Shtin A. N. Otsenka moshchnosti tiristornykh ustroystv pereklyucheniya otvodov obmotki transformatora [Power evaluation of thyristor devices of switching transformer winding bends] // Transport of the Urals. 2012. № 2 (33). S. 129–132. ISSN 1815–9400.
2. Arzhannikov B. A. Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov : monografiya [Traction power supply of high-speed and heavy trains : a monograph]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2012. 207 s.
3. Arzhannikov B. A., Naboychenko I. O. Kontseptsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV : monografiya [A concept for reinforcement of 3.0 kV DC traction power supply system : a monograph]. Ekaterinburg : Izd-vo UrGUPS, 2015. 258 s.
4. Naboychenko I. O., Arzhannikov B. A., Sergeev B. S. Elektrosnabzhenie ustroystv i sistem avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Power supply of automation, remote control and communication devices and systems] // Zheleznodorozhnyi transport. 2004. № 6. S. 48–49. ISSN 0044–4448.

УДК 621.332:3(07)

Александр Петрович Сухогузов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Николай Леонидович Иванов, кандидат технических наук, руководитель испытательного центра технических средств железнодорожного транспорта (ИЦ ТСЖТ) Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Юрий Александрович Кочунов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

Alexander Petrovich Sukhoguzov, PhD in Engineering, Professor, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Nikolay Leonidovich Ivanov, PhD in Engineering, Head of Railway Facilities Testing Center (IC TSZhHT), Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Yuriy Alexandrovich Kochunov, Senior Lecturer, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Thermomechanical testing of a polymer bracket

Аннотация

В статье приведены результаты термомеханических испытаний полимерного кронштейна для самонесущих изолированных проводов (КПСИП-3) воздушной линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–10 кВ устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и продольного электроснабжения (ПЭ).

Ключевые слова: полимерный кронштейн, климатическая камера, термомеханические испытания, электрические испытания.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-93-96

Summary

The paper presents the results of thermomechanical testing of a polymer bracket for self-supporting insulated wires (KPSIP-3) of a 6–10 kV overhead transmission line (OTL) of signaling, centralization and blocking (SCB) and longitudinal power supply (LPS) devices.

Keywords: polymer bracket, climate chamber, thermomechanical tests, electrical tests.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-93-96

Анализ отечественных и зарубежных разработок в области применения полимерных материалов (композитов) на железнодорожном транспорте показал, что это перспективное направление научных исследований и проектно-конструкторских решений [1].

На основании проведенных исследований [2–4] совместно с ООО «НПП ЭЛЕКТРОМАШ» разработан полимерный кронштейн КПСИП-3, предназначенный для фиксации самонесущих изолированных проводов воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Кронштейн КПСИП-3 не имеет изоляторов, поскольку выполнен из изоляционного материала и представляет собой связь полимерных стержней. Крепление проводов осуществляется в седла [5]. Таким образом, КПСИП-3 должен обладать и механической, и электрической прочностью, следовательно, согласно требованиям [6], должен выдерживать термомеханические и последующие электрические испытания.

Нами испытания полимерного кронштейна в ИЦ ТСЖТ УрГУПС проводились в три этапа:

- 1 — термомеханические испытания;
- 2 — электрические испытания кратковременным напряжением в сухом состоянии;
- 3 — электрические испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом.

В ходе термомеханических испытаний определялись следующие показатели: смещение оконцевателей, деформация или растрескивание, прогиб (перемещение) сжато-изогнутых элементов кронштейна при изменении температуры.

В климатической камере ИЦ ТСЖТ УрГУПС на испытательном стенде кронштейн КПСИП-3 был смонтирован в перевернутом виде (рис. 1) — такое положение позволило равномерно приложить механическую нагрузку к каждому узлу крепления проводов.

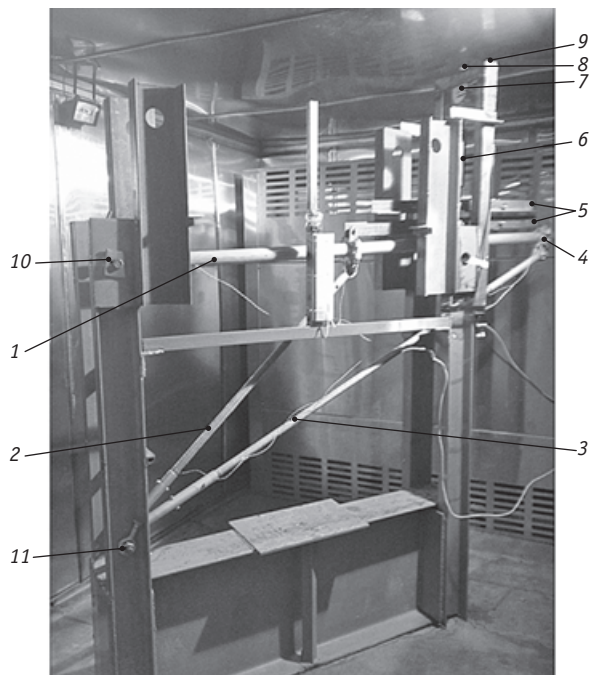


Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда внутри климатической камеры:

1 — траверса; 2 — тяга (1); 3 — тяга (2); 4 — узел крепления проводов; 5 — металлическая балка (уголок); 6 — стяжной зажим (талреп); 7 — динамометр; 8 — болт; 9 — опорная плита; 10 — узел крепления траверсы; 11 — узел крепления тяг

Величины нагрузок и схема испытания для узлов кронштейна были приняты по [7]. Схема приложения нагрузок представлена на рис. 2.

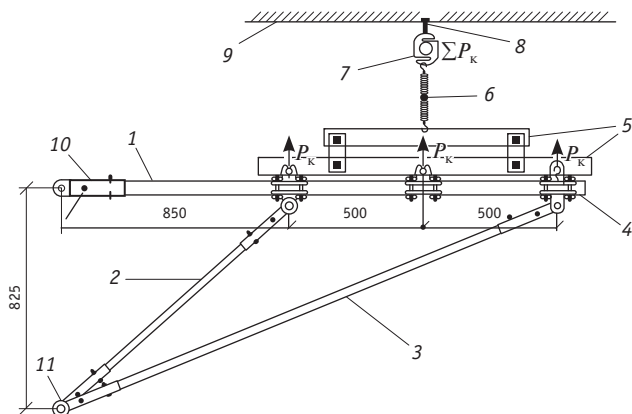


Рис. 2. Схема приложения нагрузок P_k к кронштейну ПКСП-3 (условные обозначения те же, что на рис. 1)

Чтобы обеспечить нагрузку $P_k = 1,7$ кН [7] (см. рис. 2) для каждого узла фиксации проводов, на стенде путем соединения металлических балок при помощи стяжного зажима через динамометр (АЦДУ-50И-1), зафиксированный болтом к опорной плите, устанавливалась суммарная распределенная нагрузка $\sum P_k = 5,1$ кН.

Испытания на термомеханическую прочность проводились воздействием на кронштейн четырех 24-часовых циклов охлаждения и нагрева от -60 до $+50$ °С и последующего охлаждения до температуры окружающего воздуха с одновременным приложением механической силы, равной P_k , которая должна оставаться постоянной в течение каждого цикла [7]. Механическая нагрузка прикладывалась к кронштейну перед началом каждого цикла температурного воздействия при нормальных атмосферных условиях ($t_0 = 20$ °С, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $h_0 = 11$ г/м³) в соответствии с [8] и полностью снималась в конце цикла. Минимальная и максимальная температура рабочей среды выдерживалась не менее 4 ч температурного цикла, как показано на рис. 3, в соответствии с [6].

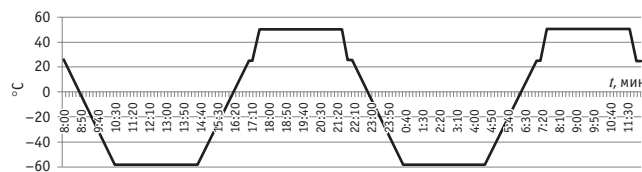


Рис. 3. Температурный цикл испытаний

Для регистрации перемещения использовался комплекс Spider 8 [9], состоящий из датчика перемещения (рис. 4а) и блока сбора и обработки данных (рис. 4б). Датчик крепился к раме стенда, планка датчика устанавливалась в точке крепления второго провода на траверсе кронштейна (рис. 4в).

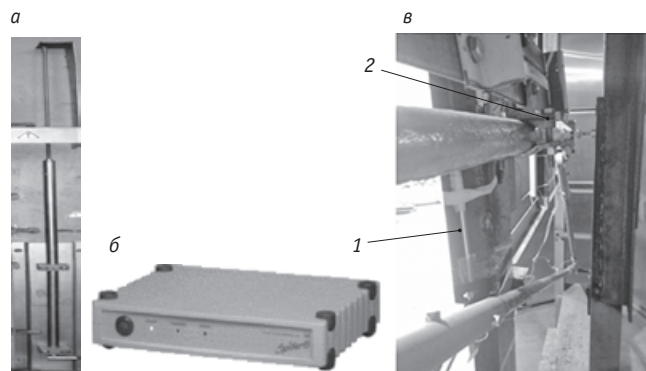


Рис. 4. Комплекс Spider 8:

а — датчик перемещений; б — блок-система сбора данных; в — крепление датчика на стенде (1 — датчик, 2 — планка датчика)

По итогам термомеханических испытаний полимерного кронштейна на прочность получены следующие результаты: смещения оконцевателей не зафиксировано; деформации или растрескивания (металлических и стеклопластиковых элементов кронштейна) не зафиксировано; прогиб траверсы составил $\Delta h = 7,5$ мм, что не превышает $1/150$ длины элемента [10] и не превышает допустимый прогиб $\Delta h_{\text{доп}} = 8$ мм; при изменении температурных режимов прогиб траверсы (в точке фиксации второго провода) составляет не более $h = 0,01725$ мм, что не влияет на соотношение $1/150$ (рис. 5).

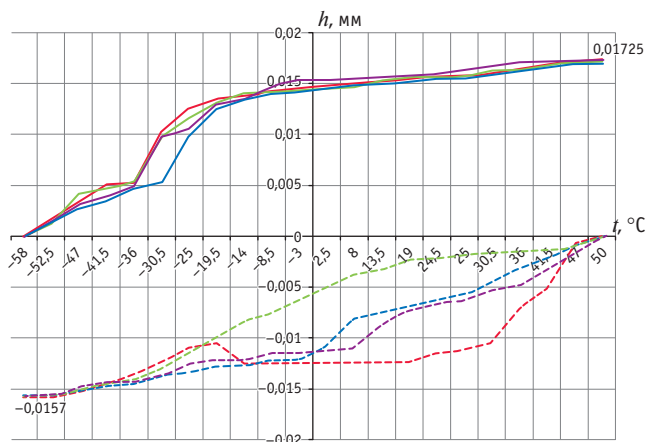


Рис. 5. График перемещения траверсы кронштейна в зоне фиксации второго провода, полученный при помощи Spider 8

— 1-й цикл; — 2-й цикл;
— 3-й цикл; — 4-й цикл

По завершении четвертого цикла термомеханических испытаний не позднее чем через 24 ч кронштейн испытывали кратковременным напряжением в сухом состоянии согласно [7]. В процессе электрических испытаний КПСИП-3 должен был обеспечить электрическую прочность и в соответствии с [6, 7] не допустить появления таких дефектов, как трещины, местная эрозия, науглероженные побегой общей длиной 10 см и пробой изоляционной части.

Испытания проводились для двух участков: 1 — фаза — земля; 2 — между фазами. В лаборатории техники высоких напряжений (ТВН) УрГУПС в испытательной ячейке аппарата АИД-70 был установлен объект испытаний (рис. 6а). Оконцеватели, предназначенные для крепления кронштейна к опоре, заземлили, а узлы фиксации проводов соединили проводником друг с другом, создав один потенциал на зажимах. В ходе испытания в соответствии с [6] подавалось переменное напряжение 40 кВ (фаза — земля), которое выдерживалось в течение 5 мин согласно п. 7.4.2.2 [8] (рис. 6б).

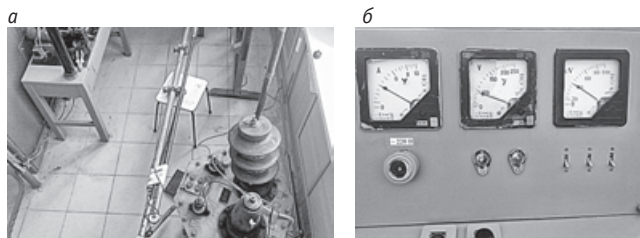


Рис. 6. Фрагмент испытания кратковременным напряжением между фазой и землей:

а — рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью; б — показания измерительных приборов

Дальний (от оконцевателя траверсы) узел фиксации провода (отсоединив тягу) соединили с заземлением, а на центральный узел подали напряжение (рис. 7а). В ходе испытания (между фазами) подавалось переменное напряжение 40 кВ

в соответствии с [6], которое выдерживалось на образце в течение 5 мин согласно п. 7.4.2.2 [8] (рис. 7б).

В ходе испытаний полимерного кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью, а также между фазами получены следующие результаты:

пробой не зафиксирован;
искр, треков не наблюдалось.

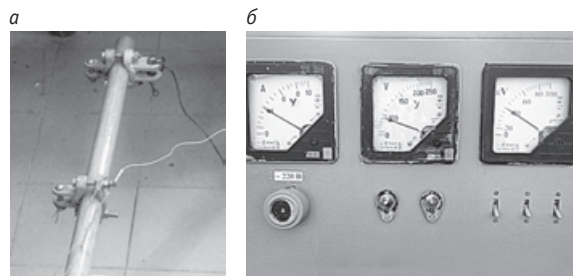


Рис. 7. Фрагмент испытания кратковременным напряжением между фазами:

а — рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазами; б — показания измерительных приборов

Электрические испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом проведены по завершении четвертого цикла термомеханических испытаний согласно [7]. При испытаниях полимерный кронштейн должен обеспечить стойкость к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом согласно [6–8], а также обеспечить электрическую прочность и в соответствии с [6, 7] не допустить появления следующих дефектов: трещин, местной эрозии, науглероженных побегов общей длиной 10 см и пробоя изоляционной части.

В испытательной ячейке генератора импульсных напряжений (ГИН) лаборатории ТВН УрГУПС на заземленной станине установили кронштейн таким образом, чтобы узлы фиксации проводов находились под одним потенциалом, оконцеватели траверсы и короткой тяги соединили между собой и с «высоковольтной иглой» испытательной установки.

Во время испытания подавалось переменное импульсное напряжение, величина которого составила $U = 180$ кВ, крутизна фронта импульса составила $\tau = 0,15$ мкс, что соответствует требованиям [6]. На рис. 8 представлен фрагмент испытания импульсным напряжением с крутым фронтом при помощи ГИН с фиксацией разряда.

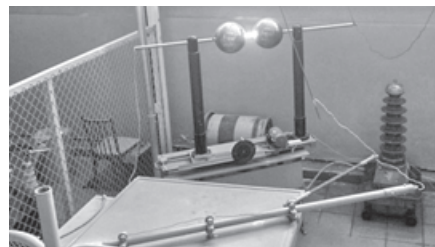


Рис. 8. Фрагмент испытания импульсным напряжением с фиксацией разряда

В ходе испытания кронштейна импульсным напряжением с крутым фронтом получены следующие результаты:

пробой кронштейна не зафиксирован;

искр, треков на поверхности кронштейна не наблюдалось.

По результатам проведенных термомеханических испытаний сделаны следующие выводы.

1. Представленный на испытания кронштейн соответствует требованиям нормативно-технической документации.

2. Кронштейн КПСИП-3 выдержал термомеханические испытания и испытания импульсным напряжением с крутым фронтом.

3. Кронштейн выдержал испытания кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазами, а также между фазой и заземленной частью.

4. Полученные данные прогиба траверсы могут быть использованы в рекомендациях при расчете механических напряжений.

5. Кронштейн КПСИП-3 может быть рекомендован для проведения эксплуатационных испытаний.

Литература

1. Кочунов Ю. А., Грехов А. О. Контактная сеть будущего // РСП Эксперт. 2014. № 12 (68). С. 17–18.
2. Кочунов Ю. А. Применение композитных материалов для изготовления поддерживающих конструкций линий продольного электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 76–80. ISSN 1815–9400.
3. Кочунов Ю. А. Аналитическое определение прочности стеклопластикового кронштейна проводов для линий продольного электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 3 (43). С. 102–108. ISSN 1815–9400.
4. Аржанников Б. А., Афанасьева Н. А., Кочунов Ю. А. Технико-экономическое обоснование применения кронштейна ВЛ СЦБ и ПЭ, выполненного из композитного материала // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 92–95. ISSN 1815–9400.
5. Устройство крепления проводов линии электропередачи к опоре / Б. А. Аржанников, А. Н. Аминев, Ю. А. Кочунов : пат. на полезную модель 133360 Рос. Федерация. № 2013129108/07 ; заявл. 25.06.13 ; опубл. 10.10.13, Бюл. № 28.
6. ГОСТ 28856–90. Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия. М., 2010.
7. ТУ 5264–882–01393674–2015. Кронштейны из полимерных материалов для контактной сети железных дорог.
8. ГОСТ 1516.2–97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Мн, 1998.
9. Измерительные усилители на базе ПК. Руководство по эксплуатации / ООО «КВТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hbm.ru/> (дата обращения: 12.10.2015).
10. СТН ЦЭ 141–99. Нормы проектирования контактной сети. М. : МПС России, 2001.

References

1. Kochunov Yu. A., Grekhov A. O. Kontaktnaya set budushchego [Catenary of the future] // RSP Ekspert. 2014. № 12 (68). S. 17–18.
2. Kochunov Yu. A. Primenenie kompozitnykh materialov dlya izgotovleniya podderzhivayushchikh konstruktсий liniy prodolnogo elektrosnabzheniya [Application of composite materials for manufacturing of supporting structures of longitudinal power supply lines] // Transport of the Urals. 2014. № 1 (40). S. 76–80. ISSN 1815–9400.
3. Kochunov Yu. A. Analiticheskoe opredelenie prochnosti stekloplastikovogo kronshteyna provodov dlya liniy prodolnogo elektrosnabzheniya [Analysis of the strength of glass-fiber wire bracket for longitudinal power lines] // Transport of the Urals. 2014. № 3 (43). S. 102–108. ISSN 1815–9400.
4. Arzhannikov B. A., Afanasieva N. A., Kochunov Yu. A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya kronshteyna VL SStB i PE, vypolnennogo iz kompozitnogo materiala [Feasibility study of the use of composite arm of signaling and interlocking overhead line and longitudinal power supply line] // Transport of the Urals. 2015. № 2 (45). S. 92–95. ISSN 1815–9400.
5. Ustroystvo krepneniya provodov liniy elektroperedachi k opore [A device for fastening power line wires to a pole] / B. A. Arzhannikov, A. N. Aminev, Yu. A. Kochunov : pat. na poleznuyu model 133360 Ros. Federatsiya. № 2013129108/07 ; yayavl. 25.06.13 ; opubl. 10.10.13, Byul. № 28.
6. GOST 28856–90. Izolyatory lineynye podvesnye sterzhnevye polimernye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Line suspension polymeric rod insulators. General specifications]. M., 2010.
7. TU 5264–882–01393674–2015. Kronshteyny iz polimernykh materialov dlya kontaktnoy seti zheleznnykh dorog [Polymeric brackets for railway catenary].
8. GOST 1516.2–97. Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe. Obshchie metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii [Electrical equipment and AC electric installations designed for voltage 3 kV and above. General dielectric strength test methods]. Mn, 1998.
9. Izmeritelnye usiliteli na baze PK. Rukovodstvo po ekspluatatsii [PC-based measuring amplifiers. Operating manual] / OOO «KVT» [Electronic resource]. URL: <http://www.hbm.ru/> (date accessed: 12.10.2015).
10. STN TsE 141–99. Normy proektirovaniya kontaktnoy seti [Catenary design standards]. M. : MPS Rossii, 2001.

УДК 621.43.001.42

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автотранспорта и производственное обучение» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (ЮУрГУ), доцент кафедры «Эксплуатация автотранспорта и производственное обучение» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Олег Николаевич Ларин, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Российского института стратегических исследований (РИСИ), Москва, Станислав Семенович Куков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автотранспорта и производственное обучение» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Дмитрий Дмитриевич Бакайкин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автотранспорта и производственное обучение» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОТРАНСПОРТА НА ТЕСТОВЫХ РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Associate Professor, Department of Motor Transport Operation and Industrial Training, South Ural State Agricultural University (SUSAU), Chelyabinsk, Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Motor Transport Operation, South Ural State University (National Research University) (SUSU), Associate Professor, Department of Motor Transport Operation and Industrial Training, South Ural State Agricultural University (SUSAU), Chelyabinsk, Oleg Nikolayevich Larin, DSc in Engineering, Professor, Lead Researcher, Russian Institute for Strategic Studies (RISS), Moscow, Stanislav Semyonovich Kukov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Motor Transport Operation and Industrial Training, South Ural State Agricultural University (SUSAU), Chelyabinsk, Dmitriy Dmitrievich Bakaykin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Motor Transport Operation and Industrial Training, South Ural State Agricultural University (SUSAU), Chelyabinsk

Research of a method to improve environmental performance and economical efficiency of motor transport with combustion engine in test idle modes

Аннотация

Дан анализ методов снижения токсичности отработавших газов. Среди них выделен наиболее оптимальный — отключение цилиндров поршневых автомобильных двигателей. При проведении экспериментальных исследований на основе использования запатентованного приборного средства с интерфейсом программы установлено, что отключение цилиндров положительно сказывается на снижении токсичности выхлопных газов — это отмечается на всех экспериментальных режимах. Наибольшая экономия топлива достигается при частоте вращения коленчатого вала 3000 мин^{-1} , на данном режиме при отключении двух цилиндров она составляет $1,45 \text{ л/ч}$, или около 30%.

Ключевые слова: отключение цилиндров двигателя, автотранспортное средство, частота вращения, токсичность, топливная экономичность, отработавшие газы.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-97-102

Summary

The paper presents the analysis of methods to reduce exhaust toxicity. The most optimal method is highlighted — disabling cylinders of piston engines. Experimental studies involving the use of a patented instrument with software interface found that disabling the cylinders has a positive impact on reducing exhaust toxicity — it is marked in all experimental conditions. Maximum fuel economy is achieved at crankshaft speed of 3000 min^{-1} ; in this mode, when two cylinders are disabled it is 1.45 l/h , or about 30%.

Keywords: disabling engine cylinders, vehicle, speed, toxicity, fuel economy, exhaust gases.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-97-102

На современном этапе, так же как и раньше, приоритетное направление развития автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) связано с улучшением их топливной экономичности и снижением токсичности отработавших газов (ОГ). В настоящее время доработка конструкции ДВС пришла к логическому завершению и классическая схема с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) уже не в состоянии обеспечить дальнейшее усовершенствование эксплуатационных свойств двигателя, в частности экономичность его работы, при одновременном снижении токсичности ОГ. Один из путей решения этой задачи — регулирование рабочего объема ДВС на режимах частичных нагрузок методом отключения цилиндров (ОЦ) [1–3].

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во время эксплуатации автомобиля максимальная мощность двигателя используется лишь непродолжительное время. Основную часть работы ДВС составляют режимы холостого хода и малых нагрузок. В то же время максимальная топливная экономичность достигается двигателем при использовании 70–80%

проектной мощности, поэтому на частичных режимах ДВС имеют так называемый недобор экономичности [1–10]. Сущность ОЦ заключается в том, чтобы на частичных режимах исключить из эксплуатации некоторые из цилиндров, а оставшиеся заставить работать с большей нагрузкой, т. е. на 70–80 % от их максимально возможной мощности. На сегодняшний день известны такие основные способы ОЦ поршневых автомобильных двигателей, как отключение топливopодачи в цилиндры ДВС и сообщение отключенных цилиндров с атмосферой или с выпускным трубопроводом двигателя; отключение топливopодачи совместно с воздействием на органы газораспределения; деактивация работающих цилиндров путем остановки деталей поршневой группы (модульное ОЦ). В настоящей работе рассматривается первый способ ОЦ.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработать метод эксплуатации ДВС с отключением его цилиндров. Исходя из цели можно сформулировать задачи исследований: провести анализ существующих методов ОЦ и их влияния на параметры работы двигателя; экспериментально изучить, как отключение части цилиндров ДВС ЗМЗ-406 будет влиять на параметры его работы.

В настоящее время существует множество методов, позволяющих снизить токсичность отработавших газов:

- уменьшение удельного расхода топлива в автомобилях;
- применение принципиально новых конструкций двигателей;
- повышение качества топлива и добавление в них присадок;
- использование экологически безопасных видов топлива;
- утилизация или нейтрализация вредных выбросов;
- улучшение аэродинамических форм и уменьшение массы автомобиля;

- диагностирование и мониторинг систем двигателя;
- электронное регулирование системы охлаждения;
- регулируемые фазы газораспределения;
- рециркуляция отработавших газов;
- переменная степень сжатия.

В результате анализа исследований, связанных с повышением топливной экономичности, считаем, что необходимо подробнее изучить метод отключения цилиндров ДВС.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Один из основных эксплуатационных показателей работы автотранспорта — топливная экономичность Q_{τ} , которую оценивают удельным расходом топлива в литрах на 100 т-км транспортной работы:

$$Q_{\tau} = \frac{G_{\text{сум}} \cdot 10^5}{L_{\text{гр}} \cdot G_{\text{гр}} \cdot \rho_{\text{т}}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{сум}}$ — количество топлива, израсходованное транспортным средством за определенный пробег, кг;

$L_{\text{гр}}$ — пробег транспортного средства с грузом, км;

$G_{\text{гр}}$ — полезный груз, перевозимый транспортным средством, кг;

$\rho_{\text{т}}$ — плотность топлива, г/см³.

Расход топлива за пробег определяется суммой произведенных часовых расходов топлива и времени работы при различных нагрузочных режимах двигателя. Часовой расход топлива можно оценить, если знать индикаторный КПД двигателя, низшую теплоту сгорания, рабочий объем цилиндра, количество работающих цилиндров, частоту вращения коленчатого вала, среднее эффективное давление и условное давление механических потерь двигателя:

$$G_{\tau} = i \cdot n \cdot p_e \frac{0,12 V_h}{H_u \cdot \eta_i \cdot \tau} + p_{\text{мп}}. \quad (2)$$

Однако при отключении части цилиндров индикаторный КПД, среднее эффективное давление и условное давление механических потерь будут изменяться. Поэтому по формуле (2) определять расход топлива при отключении цилиндров некорректно. В зависимости от нагрузочного режима работы двигателя величина его среднего эффективного давления связана с крутящим моментом соотношением

$$p_e = \frac{3 M_e \cdot \tau}{955 V_h \cdot i}, \quad (3)$$

где M_e — текущее значение крутящего момента, равное моменту сопротивления на валу двигателя $M_{\text{ср}}$ Н·м,

$$M_e = M_{\text{ср}}, \quad (4)$$

которое связано с коэффициентом загрузки двигателя K_3 выражением

$$K_3 = \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{ен}}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{ен}}$ — крутящий момент при номинальном режиме работы двигателя, Н·м.

Функция часового расхода топлива от показателей загрузки транспортного средства в зависимости от режима и параметров работы двигателя, изменяющихся при отключении части его цилиндров, имеет вид

$$G_{\tau} = k_n \frac{0,12 \cdot n_n}{n_i \cdot \eta_{i-Z_p}} \left(K_{3-Z_p} \frac{3 M_{\text{ен}}}{955} + p_{\text{мп-Z}_p} \frac{V_h}{\tau} Z_p \right). \quad (6)$$

Таким образом, на расход топлива влияют: степень изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя, величина индикаторного КПД, коэффициент загрузки двигателя, число работающих цилиндров и условное среднее давление механических потерь. Загрузка цилиндра характеризуется индикаторным давлением p_i в нем:

$$p_i = p_e + p_{\text{мп}}, \quad (7)$$

где p_e — условное среднее эффективное давление в цилиндре; $p_{\text{мп}}$ — условное давление механических потерь.

На режиме холостого хода индикаторное давление равно давлению механических потерь:

$$p_i = p_{мп} \quad (8)$$

Величина условного среднего эффективного давления для двигателя без ОЦ (p_{e_i}) определяется как

$$p_{e_i} = \frac{N_e \cdot 30\tau}{V_h \cdot i \cdot n}, \quad (9)$$

или

$$p_{e_i} = K_3 \frac{M_{кн} \cdot 30\tau}{9550 V_h \cdot i}. \quad (10)$$

Условное среднее эффективное давление в двигателе при отключении части цилиндров $p_{e_z_p}$ зависит от числа работающих цилиндров:

$$p_{e_z_p} = p_{e_i} \frac{i}{z_p}, \quad (11)$$

где p_{e_i} — условное среднее давление в двигателе без ОЦ, МПа;
 z_p — количество работающих цилиндров двигателя.

Аналогичным образом выражается условное среднее давление механических потерь $p_{мп_z_p}$ с учетом изменения при отключении цилиндров:

$$p_{мп_z_p} = p_{мп_i} \frac{i}{z_p} k_m, \quad (12)$$

где $p_{мп_i}$ — условное среднее давление механических потерь двигателя без ОЦ;

k_m — коэффициент изменения механических потерь двигателя при отключении части цилиндров.

Таким образом, индикаторное давление двигателя при отключении цилиндров составит

$$p_{i_z_p} = p_{мп} k_m + p_{e_i} \frac{i}{z_p}. \quad (13)$$

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментальных исследований использовалось приборное средство — догрузатель двигателя ДБД-3, имеющее программное управление и интерфейс (рис. 1). Информация фиксировалась в виде выходных значений процесса работы двигателя при выключении одного, двух и трех цилиндров [2–21].

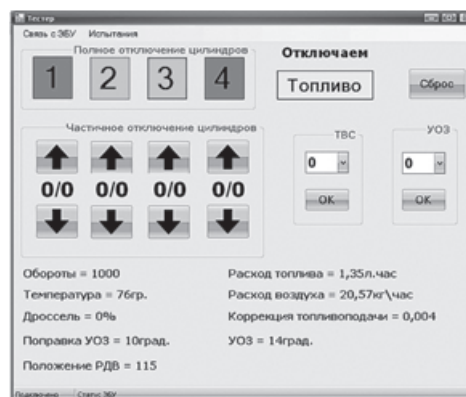


Рис. 1. Пример программного интерфейса в режиме съема экспериментальных данных при двух выключенных из работы цилиндрах

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При помощи прибора для ОЦ экспериментально определены зависимости показателей тестовых режимов от количества отключенных цилиндров при работе ДВС. Основное внимание уделено тому, как число отключенных цилиндров влияет на токсичность отработавших газов (содержание СО и СН) и топливную экономичность (расход топлива, л/ч). В частности, в ходе эксперимента исследована зависимость изменения токсичности ОГ двигателя при отключении его цилиндров на различных частотах вращения коленчатого вала (табл. 1).

На основе экспериментальных данных, представленных в табл. 1, построены графики изменения токсичности отработавших газов двигателя (рис. 2).

Таблица 1

Результаты замеров токсичности отработавших газов при отключении цилиндров ДВС

Частота вращения, мин ⁻¹	Без отключения цилиндров		Работа на трех цилиндрах		Работа на двух цилиндрах		Работа на одном цилиндре	
	СО, %	СН, млн ⁻¹	СО, %	СН, млн ⁻¹	СО, %	СН, млн ⁻¹	СО, %	СН, млн ⁻¹
1000	0,41	370	0,4	350	0,36	330	0,28	290
1500	0,37	300	0,35	280	0,32	260	0,24	220
2000	0,34	240	0,3	220	0,27	200	0,22	180
2500	0,3	180	0,28	170	0,25	160	0,2	140
3000	0,25	150	0,25	130	0,23	110	0,18	90
3500	0,16	60	0,15	30	0,15	20	0,14	18

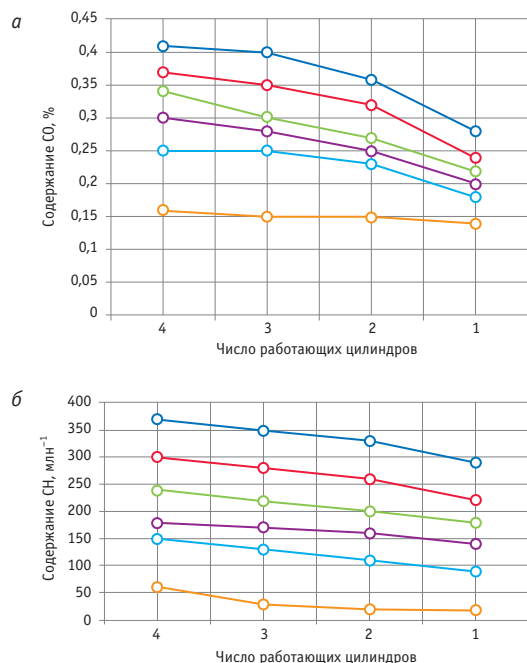


Рис. 2. Графики изменения содержания оксида углерода (а) и углеводородов (б) в отработавших газах ДВС в зависимости от числа работающих цилиндров при различных частотах вращения коленчатого вала (диапазон 1000–3500 мин⁻¹):
 — 1000; — 1500; — 2000; — 2500; — 3000; — 3500

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, показал, что применяемый метод ОЦ обеспечивает снижение токсичности отработавших газов на всех экспериментальных режимах. Наибольший эффект достигается на режиме с максимальными оборотами коленчатого вала, рассмотренными в эксперименте (3500 мин⁻¹). На данном режиме при работе двигателя на одном цилиндре показатели токсичности наименьшие.

Кроме того, в ходе эксперимента исследована зависимость изменения расхода топлива при отключении цилиндров на различных частотах вращения коленчатого вала двигателя (табл. 2).

На основе данных табл. 2 построены зависимости изменения часового расхода топлива от количества отключаемых цилиндров ДВС (рис. 3).

Анализ рис. 3 показывает, что применяемый метод ОЦ обеспечивает снижение расхода топлива на всех экспериментальных режимах. Наибольший эффект достигается при частоте вращения коленчатого вала двигателя, составляющей 3000 мин⁻¹. На данном режиме при отключении двух цилиндров экономия топлива составляет 1,45 л/ч, или около 30 %.

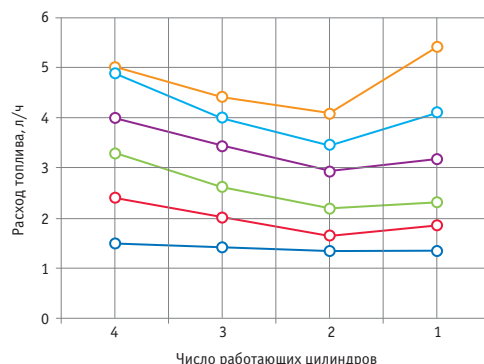


Рис. 3. График изменения величины расхода топлива в зависимости от числа работающих цилиндров при различных частотах вращения коленчатого вала (диапазон 1000–3500 мин⁻¹):
 — 1000; — 1500; — 2000; — 2500; — 3000; — 3500

ВЫВОДЫ

Предложенный способ с частичным и полным отключением цилиндров ДВС является эффективным для улучшения работы двигателя. Например, в конкретных экспериментальных условиях наименьшие показатели содержания оксидов углерода (СО) и углеводорода (СН) наблюдаются на режиме, обеспечивающем работу двигателя на одном цилиндре при частоте вращения коленчатого вала 3500 мин⁻¹. Аналогично для всех режимов отмечено снижение часового расхода топлива. Наибольшая экономия топлива достигнута при частоте вращения коленчатого вала двигателя 3000 мин⁻¹. На данном режиме при отключении двух цилиндров экономия топлива составляет 1,45 л/ч, или около 30 %.

Таблица 2

Результаты замеров расхода топлива при отключении цилиндров ДВС

Частота вращения, мин ⁻¹	Расход топлива, л/ч			
	Без отключения цилиндров	Работа на трех цилиндрах	Работа на двух цилиндрах	Работа на одном цилиндре
1000	1,5	1,42	1,35	1,36
1500	2,4	2,03	1,65	1,85
2000	3,3	2,62	2,2	2,32
2500	4	3,45	2,95	3,17
3000	4,9	3,98	3,45	4,1
3500	5	4,43	4,1	5,42

Литература

1. Кульчицкий А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для высш. шк. М. : Академ. проект, 2004. 400 с.
2. Уханов Д. А. Новый принцип работы бензиновых двигателей на режиме холостого хода // Вестник СГАУ им. Н. И. Вавилова. 2008. № 4. С. 66–69. ISSN 1998–6548.
3. Гриценко А. В. Разработка методов тестового диагностирования работоспособности систем питания и смазки двигателей внутреннего сгорания (экспериментальная и производственная реализация на примере ДВС автомобилей) : дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 2014. 397 с.
4. Карпенко А. Г., Глемба К. В., Белевитин В. А. Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие. Челябинск : Изд-во ЧГПУ, 2014. 124 с.
5. Гриценко А. В. Диагностирование систем двигателя внутреннего сгорания бестормозным методом с перераспределением цилиндровых нагрузок // Вестник ЧГАА. 2011. Т. 58. С. 108–110. ISSN 2227–7005.
6. Гриценко А. В., Куков С. С. Диагностирование систем ДВС на тестовых статических режимах // Вестник ЧГАА. 2012. Т. 61. С. 31–38. ISSN 2227–7005.
7. Гриценко А. В., Куков С. С. Обоснование и разработка средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Матер. I междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки — агропромышленному производству». Челябинск : ЧГАА, 2011. С. 6–11.
8. Гриценко А. В., Куков С. С. Обоснование и разработка эффективных систем диагностирования двигателей внутреннего сгорания мобильных сельскохозяйственных машин // Матер. I междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки — агропромышленному производству». Челябинск : ЧГАА, 2012. Ч. 3. С. 20–25.
9. Гриценко А. В., Куков С. С. Определение эффективности использования средств технического диагностирования с учетом частоты отказов систем ДВС // Вестник ЧГАА. 2012. Т. 60. С. 45–48. ISSN 2227–7005.
10. Гриценко А. В., Куков С. С. Разработка эффективных средств и методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Вестник ЧГАА. 2011. Т. 58. С. 111–117. ISSN 2227–7005.
11. Гриценко А. В., Цыганов К. А. Диагностирование электрических бензонасосов автомобилей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. № 4. С. 22–23. ISSN 0206–572X.
12. Гриценко А. В., Плаксин А. М. Диагностирование системы питания ДВС // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 1. С. 24–26. ISSN 0206–572X.
13. Диагностирование электрических бензиновых насосов по комплексным выходным параметрам / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба и др. // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. Ч. 12. С. 2610–2614. ISSN 1812–7339.
14. Результаты исследования выходных характеристик электрических насосов автомобилей при имитации сопротивления в нагнетательном топливопроводе / А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, К. В. Глемба и др. // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. Ч. 5. С. 991–995. ISSN 1812–7339.

References

1. Kulchitskiy A. R. Toksichnost avtomobilnykh i traktornykh dvigateley : ucheb. posobie dlya vyssh. shk. [Toxicity of automobile and tractor engines exhausts : a textbook for universities]. M. : Akadem. proekt, 2004. 400 s.
2. Ukhonov D. A. Noviy printsip raboty benzinovykh dvigateley na rezhime kholostogo khoda [A new principle of operation of gasoline engines in idle mode] // Vestnik SGAU im. N. I. Vavilova. 2008. № 4. S. 66–69. ISSN 1998-6548.
3. Gritsenko A. V. Razrabotka metodov testovogo diagnostirovaniya rabotosposobnosti sistem pitaniya i smazki dvigateley vnutrennego sgoraniya (eksperimentalnaya i proizvodstvennaya realizatsiya na primere DVS avtomobiley) : dis. ... d-ra tekhn. nauk [Development of methods for performance diagnosis of power and lubrication systems of internal combustion engines (experimental and industrial implementation based on vehicles with internal combustion engines) : DSc in Engineering Thesis]. Chelyabinsk, 2014. 397 s.
4. Karpenko A. G., Glemba K. V., Belevitin V. A. Avtomobilnye ekspluatatsionnye materialy : ucheb. posobie [Car maintenance materials : a textbook]. Chelyabinsk : Izd-vo ChGPU, 2014. 124 s.
5. Gritsenko A. V. Diagnostirovanie sistem dvigatelya vnutrennego sgoraniya bestormoznym metodom s pereraspredeleniem tsilindrovyykh nagruzok [Diagnosis of internal combustion engine systems using non-brake method with redistribution of loads] // Vestnik ChGAA. 2011. T. 58. S. 108–110. ISSN 2227-7005.
6. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Diagnostirovanie sistem DVS na testovykh staticheskikh rezhimakh [Diagnosing internal combustion engine systems under static test conditions] // Vestnik ChGAA. 2012. T. 61. S. 31–38. ISSN 2227-7005.
7. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Obosnovanie i razrabotka sredstv i metodov diagnostirovaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya avtomobiley [Rationale and development of tools and methods of diagnosing internal combustion engines of automobiles] // Mater. I mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Dostizheniya nauki — agropromyshlennomu proizvodstvu». Chelyabinsk : ChGAA, 2011. S. 6–11.
8. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Obosnovanie i razrabotka effektivnykh sistem diagnostirovaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya mobilnykh sel'skokhozyaystvennykh mashin [Rationale and development of effective systems of diagnosing internal combustion engines of mobile agricultural machinery] // Mater. I mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Dostizheniya nauki — agropromyshlennomu proizvodstvu». Chelyabinsk : ChGAA, 2012. Ch. 3. S. 20–25.
9. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Opredelenie effektivnosti ispolzovaniya sredstv tekhnicheskogo diagnostirovaniya s uchetyom chastoty otkazov sistem DVS [Determining efficiency of the use of technical diagnostic tools based on the failure rates of internal combustion engine systems] // Vestnik ChGAA. 2012. T. 60. S. 45–48. ISSN 2227-7005.
10. Gritsenko A. V., Kukov S. S. Razrabotka effektivnykh sredstv i metodov diagnostirovaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya avtomobiley [Development of effective tools and methods for diagnosis of internal combustion engines of automobiles] // Vestnik ChGAA. 2011. T. 58. S. 111–117. ISSN 2227-7005.
11. Gritsenko A. V., Tsyganov K. A. Diagnostirovanie elektricheskikh benzonasosov avtomobiley [Diagnosing electric gasoline pumps of motor vehicles] // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva. 2013. № 4. S. 22–23. ISSN 0206-572X.
12. Gritsenko A. V., Plaksin A. M. Diagnostirovanie sistemy pitaniya DVS [Diagnosing power systems of internal combustion engines] // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva. 2014. № 1. S. 24–26. ISSN 0206-572X.
13. Diagnostirovanie elektricheskikh benzinovykh nasosov po kompleksnym vykhodnym parametram [Diagnosing electric gasoline pumps using complex output parameters] / A. M. Plaksin, A. V. Gritsenko, K. V. Glemba i dr. // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. № 11. Ch. 12. S. 2610–2614. ISSN 1812-7339.
14. Rezultaty issledovaniya vykhodnykh kharakteristik elektricheskikh nasosov avtomobiley pri imitatsii soprotivleniya v nagnetatel'nom toplivoprovode [Results of the study of output characteristics of electric car pumps with simulation of resistance in fuel line] / A. V. Gritsenko, A. M. Plaksin, K. V. Glemba i dr. // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. № 11. Ch. 5. S. 991–995. ISSN 1812-7339.

15. Разработка методов и средств диагностирования элементов топливной системы бензиновых ДВС / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, О. Н. Ларин и др. // Контроль. Диагностика. 2015. № 3. С. 62–67. ISSN 0201–7032.
16. Разработка метода и средства диагностирования электробензонасосов системы топливоподдачи ДВС / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, О. Н. Ларин и др. // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 1. С. 40–44. ISSN 0236–1914.
17. Диагностирование электромагнитных форсунок по изменению качественного состава топливной смеси / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба и др. // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. Ч. 11. С. 2380–2384. ISSN 1812–7339.
18. Новый метод, средство и программная среда для тестирования ЭМФ автомобиля / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, О. Н. Ларин и др. // Известия ВолгГТУ, Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. 2014. № 6 (145). Т. 18. С. 53–56. ISSN 1990–5297.
19. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Приборные методы и средства повышения экологической безопасности на автотранспорте // Сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж : ВГЛТА, 2014. Т. 1. С. 200–205.
20. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. К вопросу диагностирования элементов системы топливоподдачи ДВС // Сб. науч. тр. науч.-практ. конф. «Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика». Пермь : ПНИПУ, 2014. № 1. С. 264–270.
21. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Диагностирование датчиков массового расхода воздуха легковых автомобилей // Вестник ЮУрГУ, Сер. Машиностроение. 2013. Т. 13. № 2. С. 113–118. ISSN 2410–4744.
15. Razrabotka metodov i sredstv diagnostirovaniya elementov toplivnoy sistemy benzinovykh DVS [Development of methods and tools for diagnosing of fuel system of gasoline internal combustion engines] / A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, O. N. Larin i dr. // Kontrol. Diagnostika. 2015. № 3. S. 62–67. ISSN 0201-7032.
16. Razrabotka metoda i sredstva diagnostirovaniya elektrobezonasosov sistemy toplivopodachi DVS [Development of methods and tools for diagnosing of electric gasoline pumps of ICE fuel system] / A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, O. N. Larin i dr. // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2015. № 1. S. 40–44. ISSN 0236-1914.
17. Diagnostirovanie elektromagnitnykh forsunok po izmeneniyu kachestvennogo sostava toplivnoy smesi [Diagnosing solenoid injectors for the change of qualitative composition of the fuel mixture] / A. M. Plaksin, A. V. Gritsenko, K. V. Glemba i dr. // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. № 11. Ch. 11. S. 2380-2384. ISSN 1812-7339.
18. Noviy metod, sredstvo i programmnaya sreda dlya testirovaniya EMF avtomobilya [A new method, tools and software environment for testing car EMF] / A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, O. N. Larin i dr. // Izvestiya VolgGTU, Ser. Protsessy preobrazovaniya energii i energeticheskie ustanovki. 2014. № 6 (145). T. 18. S. 53–56. ISSN 1990-5297.
19. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Pribornye metody i sredstva povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti na avtotransporte [Instrumental methods and tools to improve environmental safety of road transport] // Sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Voronezh : VGLTA, 2014. T. 1. S. 200–205.
20. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. K voprosu diagnostirovaniya elementov sistemy toplivopodachi DVS [On the issue of diagnosing elements of ICE fuel systems] // Sb. nauch. tr. nauch.-prakt. konf. «Ekologiya i nauchno-tekhnicheskii progress. Urbanistika». Perm : PNIPIU, 2014. № 1. S. 264–270.
21. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Diagnostirovanie datchikov massovogo raskhoda vozdukhа legkovykh avtomobiley [Diagnosis of mass air flow sensors of passenger cars] // Vestnik YuUrGU, Ser. Mashinostroenie. 2013. T. 13. № 2. S. 113–118. ISSN 2410-4744.

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, Борис Прокопьевич Жилкин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Николай Сергеевич Кочев, аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВПУСКА И ВЫПУСКА В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Leonid Valeryevich Plotnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Turbines and Engines, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Boris Prokopyevich Zhilkin, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Department of Thermal Engineering and Heat Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Nikolay Sergeyevich Kochev, graduate student, Department of Thermal Engineering and Heat Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg

Simulation and experimental studies of intake and exhaust processes in automotive internal combustion engines

Аннотация

В статье приведены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований процессов газообмена во впускных и выпускных трактах поршневых двигателей с наддувом и без него. Моделирование выполнено на основе программных комплексов ACTUS и ДИЗЕЛЬ-РК. Экспериментальные исследования проведены на натурных моделях одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания. Представлены расчетные и опытные зависимости изменения мгновенной скорости и давления потока газа в газовоздушных трактах от угла поворота коленчатого вала, дано их сравнение. Установлено, что наиболее достоверные результаты численного моделирования характерны для периодов открытых клапанов.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс впуска и выпуска, экспериментальные исследования, газообмен, поршневой двигатель внутреннего сгорания.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-103-107

Summary

The article presents the results of mathematical simulation and experimental studies of gas exchange processes in intake and exhaust tracts of supercharged and atmospheric reciprocating engines. The simulation has been carried out using software systems ACTUS and DIESEL-RK. Experimental studies have been conducted on full-scale models of single-cylinder internal combustion engine. Calculated and experimental dependencies of the change of instantaneous gas flow rate and pressure in gas tracts from crank angle are provided, their comparison is given. It has been established that the most reliable numerical simulation results are typical for open valve periods.

Keywords: mathematical simulation, intake and exhaust process, experimental study, gas exchange, piston internal combustion engine.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-103-107

Известно, что технико-экономические показатели автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) во многом определяются совершенством процессов, протекающих в их газовоздушных трактах. Методы исследования процессов впуска и выпуска двигателей можно разделить на две большие группы. Первая включает теоретический анализ, в том числе численное моделирование. Ко второй группе отнесем все способы экспериментального изучения процессов впуска и выпуска. При этом задача исследования процессов газообмена осложняется тем, что они являются высокочастотными и нестационарными. Потоки газа во впускных и выпускных трактах ускоряются и замедляются с частотой до 100 Гц и выше, а периоды газообмена в современных двигателях составляют сотые доли секунды. Эти особенности определяют требования к программным комплексам (математическим моделям) при численном моделировании и к системам сбора и обработки данных при экспериментальных исследованиях. Основная цель данной работы — сравнить результаты численных и экспериментальных исследований процессов впуска и выпуска (газообмена).

Перед экспериментальным исследованием газодинамических характеристик процессов газообмена в поршневых ДВС было проведено физико-математическое моделирование с помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного в МГТУ им. Н. Баумана. В качестве объекта моделирования выбран двигатель автомобиля «ВАЗ-Ока» (стандартное обозначение 2Ч 8,2/7,1), а затем его наддувная версия (2ЧН 8,2/7,1). При расчетах закладывались следующие основные исходные условия. Конструктивные параметры: бензиновый четырехтактный

103

Январь – Март

двигатель, имеющий 2 цилиндра и рядную компоновку, двух-клапанную головку цилиндра, жидкостную систему охлаждения, диаметр цилиндра — 82 мм, ход поршня — 71 мм, степень сжатия — 9,9. Параметры состояния окружающей среды: барометрическое давление $p_0 = 735$ мм рт. ст., температура $t_0 = 20$ °С, в случае моделирования двигателя с наддувом степень повышения давления π_k составляла 1,1 и 1,2. Фазы газораспределения задавались в соответствии со штатными параметрами двигателя автомобиля «ВАЗ-Ока»:

открытие впускного клапана — 33 град п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ);

закрытие впускного клапана — 79 град п.к.в. после нижней мертвой точки (НМТ);

открытие выпускного клапана — 47 град п.к.в. до НМТ;

закрытие выпускного клапана — 17 град п.к.в. после ВМТ.

Геометрические характеристики (длина и диаметр поперечного сечения) газоздушных трактов (впускных и выпускных каналов в головке, а также впускных труб и выпускных коллекторов) задавались согласно этим показателям для двигателя автомобиля «ВАЗ-Ока» и лабораторной модели двигателя при экспериментальных исследованиях.

Рассмотрим конструктивные и функциональные особенности модели одноцилиндрового поршневого двигателя для экспериментального исследования процессов газообмена с учетом газодинамической нестационарности. Она представляла собой натурную модель ДВС размерности 8,2/7,1, коленчатый вал которой через упругую муфту приводился во вращение с помощью асинхронного двигателя. Частота его вращения регулировалась преобразователем частоты в диапазоне $n = 600\text{--}3000$ мин⁻¹ с точностью $\pm 0,1\%$. Коленчатый вал вращался в закрытых подшипниках качения, устанавливаемых в опоры. Механизм газораспределения установки заимствован у двигателя автомобиля «ВАЗ-Ока» (установлена головка блока с некоторыми особенностями). К поршневой части установки была возможность подключения турбокомпрессора (ТК) ТКР-6. Подробнее комплекс экспериментальных установок для исследования процессов впуска и выпуска, а также конфигурации и места установки датчиков в газоздушных трактах описаны в [1–3].

Для проведения экспериментальных исследований на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) создана автоматизированная система сбора и обработки данных. В ней для определения средней по сечению скорости потока воздуха w_x использовался термоанемометр постоянной температуры оригинальной конструкции [4]. Чувствительным элементом датчиков термоанемометра была нихромовая нить диаметром 5 мкм и длиной 5 мм. Для измерения скорости газового потока использовался зонд со свободной нитью, размещенной перпендикулярно оси исследуемого канала. Частота вращения и индикация прохождения поршнем ВМТ и НМТ замерялись тахометром, состоящим из закрепленного на валу зубчатого диска и индуктивного датчика. Сигналы со всех датчиков поступали в АЦП, а затем передавались в персональный компьютер для дальнейшей обработки. Систематическая погрешность измерения скорости потока газа составляла не более 5,5%.

Результаты численного моделирования процесса впуска применительно к двигателю 2Ч 8,2/7,1 показаны на рис. 1. Представлены совмещенные зависимости массового расхода воздуха G_v и полного давления p_x во впускном канале от угла поворота коленчатого вала φ при разных частотах вращения последнего (n).

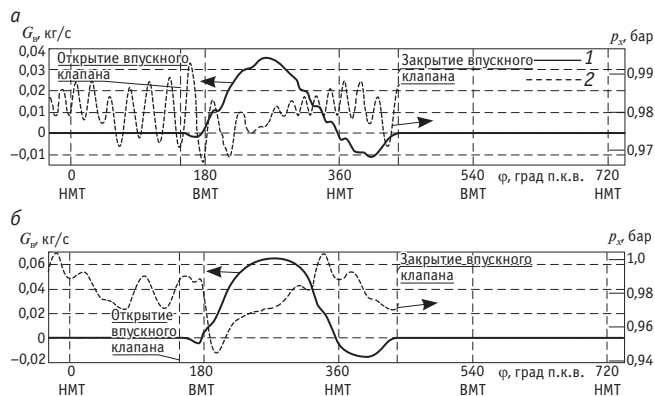


Рис. 1. Расчетные зависимости массового расхода воздуха G_v (1) и давления p_x (2) во впускном канале от угла поворота коленчатого вала φ : а — при частоте вращения коленчатого вала $n = 1500$ мин⁻¹; б — при $n = 3000$ мин⁻¹

На осциллограммах обращает на себя внимание резкое уменьшение расхода воздуха сразу после открытия впускного клапана. Это объясняется тем, что в поршневом двигателе давление в цилиндре в начале открытия клапана выше давления во впускном трубопроводе, а потому остаточные продукты сгорания вытекают через открывающийся впускной клапан, т. е. происходит так называемый заброс продуктов сгорания во впускной трубопровод [5].

Заброс во впускной трубопровод может продолжаться и после ВМТ, пока давление в цилиндре остается больше давления за выпускным и перед впускным клапаном. На расчетных зависимостях (см. рис. 1) это явление не наблюдается — наполнение цилиндра (рост расхода воздуха) происходит вблизи ВМТ. Поэтому наполнение цилиндра в двигателях без наддува начинается с запаздыванием — после ВМТ.

Известно традиционное объяснение резкого уменьшения расхода воздуха после НМТ (в конце процесса впуска) [5]. После НМТ — при перемещении поршня к ВМТ уже в такте сжатия — давление в цилиндре остается некоторое время меньше давления перед впускным клапаном, даже несмотря на снижение объема. Воздух (или топливно-воздушная смесь) продолжает поступать в цилиндр через впускной клапан. При этом, если впускной клапан закрывается после того, как давление в цилиндре сравнивается с давлением перед впускным клапаном, возникает обратное течение газов из цилиндра во впускной трубопровод. На рис. 1 данное явление можно наблюдать сразу после прохождения поршнем НМТ.

На результатах физико-математического моделирования неоднозначно выглядит отсутствие изменения расхода воздуха в период, когда впускной клапан закрыт, в то время как из-

вестно, что во впускном трубопроводе могут возникать волновые явления в течение всего рабочего цикла двигателя (в течение всех 720 град п.к.в.) [5, 6]. Подтверждение этому можно наблюдать, если обратиться к расчетному графику изменения давления во впускном трубопроводе (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что существенное изменение давления происходит в течение всего рабочего цикла двигателя (по неизвестным причинам программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК не выдает результаты изменения давления после закрытия впускного клапана). При этом можно отметить, что при средних частотах вращения коленчатого вала колебания давления во впускном трубопроводе более интенсивны, тогда как при высоких происходит некоторое их сглаживание.

Для сравнения результатов численного моделирования процесса впуска с данными экспериментальных исследований обратимся сначала к рис. 2, на котором представлены зависимости изменения скорости потока воздуха w_x и давления p_x от угла поворота коленчатого вала φ во впускном канале при разных частотах вращения коленчатого вала. Эти зависимости получены на одноцилиндровой установке, описанной выше.

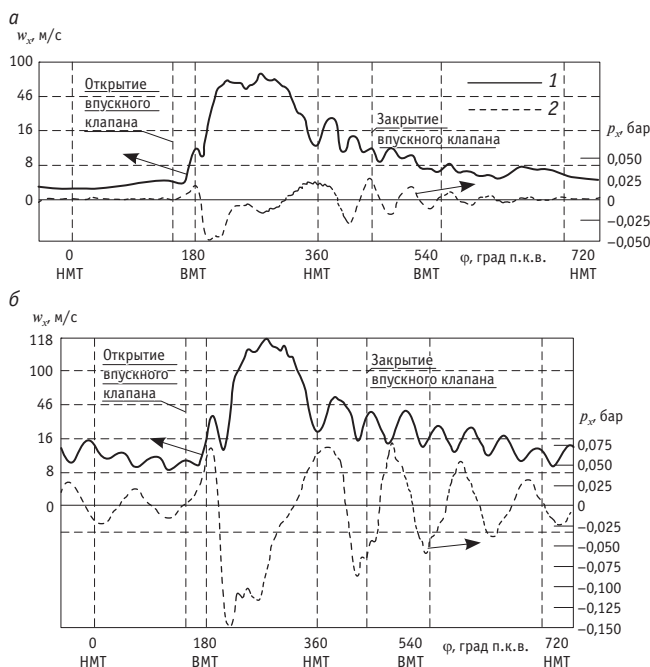


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости потока воздуха w_x (1) и давления p_x (2) от угла поворота коленчатого вала φ во впускном канале:
а — при частоте вращения коленчатого вала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$;
б — при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

На опытных осциллограммах (см. рис. 2) сразу обращают на себя внимание ярко выраженные колебания как скорости потока воздуха, так и давления во впускном канале поршневого двигателя, происходящие уже после закрытия впускного клапана (в течение всего рабочего цикла ДВС), которые не проявились при численном моделировании. При этом на экспериментально полученных кривых, как и на расчетных кривых,

можно отметить некоторое снижение скорости потока воздуха сразу после открытия впускного клапана (в начале процесса впуска). Однако подобного уменьшения не наблюдается после НМТ (в конце процесса впуска), как это было при численном моделировании.

Таким образом, можно отметить, что вид кривых изменения массового расхода воздуха во впускном канале поршневого ДВС (рис. 3), полученных экспериментально и численными методами, более-менее схож только в период открытия впускного клапана. После закрытия впускного клапана наблюдаются существенные расхождения в экспериментальных и расчетных данных.

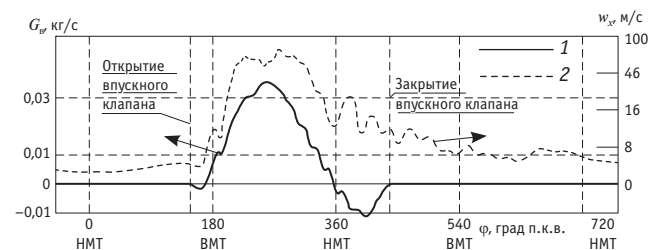


Рис. 3. Сопоставление расчетных (1) и экспериментальных (2) зависимостей массового расхода G_v и скорости потока воздуха w_x от угла поворота коленчатого вала при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

На рис. 4 представлены результаты физико-математического моделирования процесса выпуска применительно к двигателю 24 8,2/7,1: показаны зависимости расхода воздуха G_v и давления p_x в выпускном канале от угла поворота коленчатого вала φ при разных частотах вращения последнего.

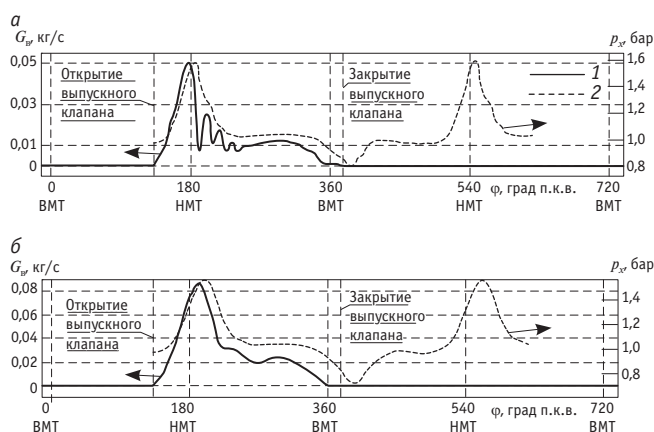


Рис. 4. Расчетные зависимости расхода воздуха G_v (1) и давления p_x (2) в выпускном канале от угла поворота коленчатого вала φ :
а — при частоте вращения коленчатого вала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$;
б — при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

В данном случае результаты численного моделирования достаточно хорошо совпадают с классической теорией рабочих процессов ДВС в плане описания протекания процессов газообмена.

Так, после открытия выпускного клапана и приблизительно до НМТ наблюдается период свободного выпуска. Истечение

газов из цилиндра происходит вследствие того, что давление в цилиндре в начале выпуска и давление вплоть до НМТ выше, чем давление в выпускном канале.

Далее от НМТ до ВМТ происходит принудительный выпуск. Скорость истечения газов и перепад давления в выпускном клапане определяются в основном скоростью движения поршня и отношением площади поперечного сечения клапанной щели к площади поршня. Следует отметить, что эта скорость также существенно зависит от характера нестационарного потока газов в выпускном трубопроводе.

Во время перекрытия клапанов в двигателе без наддува давление в цилиндре в начале открытия впускного клапана выше давления во впускном трубопроводе. Соответственно продукты сгорания вытекают одновременно через выпускной клапан и открывающийся впускной клапан, т.е. происходит заброс продуктов сгорания во впускной трубопровод. Выпуск продуктов сгорания и их заброс во впускной трубопровод может продолжаться и после ВМТ, пока давление в цилиндре остается больше давления за выпускным и перед впускным клапанами. Из рис. 4 видно, что после ВМТ изменение расхода газа практически прекращается. Во избежание чрезмерного заброса газов и ухудшения наполнения цилиндра угол перекрытия клапанов в двигателях без наддува выполняют небольшим по сравнению с комбинированными ДВС [7].

При этом известно [5, 6], что о режиме течения в выпускном канале нельзя вполне достоверно судить только по отношению среднего давления за выпускным клапаном и давления в цилиндре. Необходимо учитывать, что во время свободного выпуска в выпускном канале образуется волна давления большой амплитуды и критический режим течения обычно наступает до НМТ, а после НМТ перепад давления и скорость понижаются до значений, характерных для принудительного выпуска. При этом результаты численного моделирования подтверждают существование волн давления, образующихся в выпускном канале, однако на изменении расхода газа они никак не сказываются (см. рис. 4).

Для сравнения результатов физико-математического моделирования и экспериментальных исследований процесса выпуска обратимся к рис. 5, на котором представлены зависимости скорости потока воздуха w_x и давления p_x от угла поворота коленчатого вала φ в выпускном канале при избыточном давлении $p_b = 2,0$ бар при разных частотах вращения коленчатого вала.

Сопоставление рис. 4 и 5 показывает, что общий вид кривых изменения скорости потока воздуха и давления в выпускном канале поршневого двигателя, полученных экспериментально и численными методами, подобны за исключением двух моментов:

при экспериментальных исследованиях после закрытия выпускного клапана скорость потока не обращается в ноль; после закрытия выпускного клапана наблюдаются некоторые колебания давления газов, наиболее ярко выраженные при высоких частотах вращения коленчатого вала двигателя.

Аналогичные результаты получены авторами и для двигателя с наддувом. Однако эти результаты не рассмотрены в данной статье — они описаны в [8].

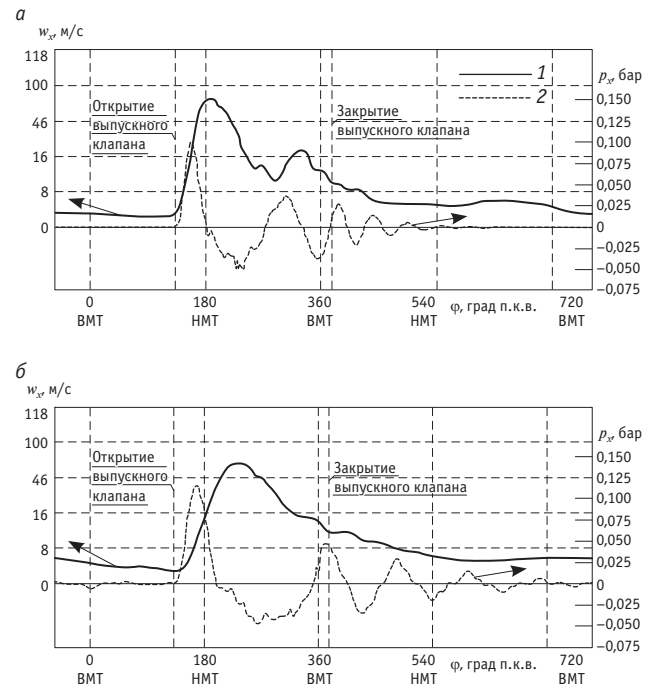


Рис. 5. Экспериментальные зависимости скорости потока воздуха w_x (1) и давления p_x (2) от угла поворота коленчатого вала φ в выпускном канале при избыточном давлении $p_b = 2,0$ бар:
а — частота вращения коленчатого вала $n = 600 \text{ мин}^{-1}$;
б — $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

На основании сопоставления результатов численного моделирования и экспериментальных исследований процессов газообмена в поршневых двигателях с наддувом и без него можно сделать следующие основные выводы об использовании принципов физико-математического моделирования в научной и инженерной работе в области двигателестроения.

1. Методы численного моделирования могут быть использованы исключительно как оценочные для прогнозирования основных характеристик процессов газообмена в двигателях внутреннего сгорания и ни в коей мере не заменяют опытно-конструкторские работы по совершенствованию рабочего цикла и отработке элементов конструкций поршневых ДВС.

2. Наиболее достоверные результаты численного моделирования характерны для периодов открытых клапанов, тогда как в остальном промежутке рабочего цикла двигателя результаты выглядят сомнительно и должны быть проверены экспериментально.

3. Даже в тех случаях, когда результаты физико-математического моделирования процессов впуска и выпуска в поршневых ДВС вполне достоверны, их необходимо дополнять лабораторными (и желательно натурными, промышленными) исследованиями.

4. Проведение физико-математического моделирования служит рациональным этапом подготовки к экспериментальным исследованиям.

5. Необходима разработка математических моделей, которые бы учитывали пульсационные явления в газозвуковых

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант мол_а, договор № 16-38-00004\16).

1. Soвершенствование протсесов в газозвдзудныхnykh traktakh porshnevnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya : monografiya [Improvement of processes in gas tracts of reciprocating internal combustion engines : a monograph] / Pod obshch. red. Yu. M. Brodova. Ekaterinburg : Izd-vo UrFU, 2015. 228 s.
2. Ob izmenenii gazodinamiki protsessa vypuska v porshnevnykh DVS pri ustanovke glushitelya [On the change of gas dynamics of exhaust process in reciprocating internal combustion engines after installation of muffler] / L. V. Plotnikov, B. P. Zhilkin, A. V. Krestovskikh, D. L. Padalyak // Vestnik Akademii voennykh nauk. 2011. № 2. S. 267–270. ISSN 2073-8641.
3. Plotnikov L. V. Eksperimentalnye opredeleniya pokazateley kachestva protsessov gazoobmena porshnevnykh DVS : ucheb. posobie [Experimental determination of quality parameters of gas exchange processes in reciprocating internal combustion engines : a textbook]. Ekaterinburg : Izd-vo UrFU, 2013. 76 s.
4. Termoanemometr postoyannoy temperatury [Constant temperature thermoanemometer] / S. N. Plokhov, L. V. Plotnikov, B. P. Zhilkin : pat. na poleznuyu model 81338 Ros. Federatsiya. № 2008135775/22 ; zayavl. 03.09.08 ; opubl. 10.03.09, Byul. № 7.
5. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley : ucheb. dlya vtuzov po spetsialnosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» [Internal combustion engines. Theory of reciprocating and combined engines : a textbook for students of technical universities specializing in «Internal Combustion Engines»] / D. N. Vyrbuv, N. A. Ivashchenko, V. I. Ivin i dr. ; pod red. A. S. Orlina i M. G. Kruglova ; 4-e izd., pererab. i dop. M. : Mashinostroenie, 1983. 372 s.
6. Dvigateli vnutrennego sgoraniya : v 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov : ucheb. [Internal combustion engines: in 3 books. Book 1. The theory of working processes : a textbook] / V. N. Lukanin, K. A. Morozov, A. S. Khachian i dr. ; pod red. V. N. Lukanina. M. : Vysshaya shkola, 1995. 368 s.
7. Sharoglazov B. A., Mashkov O. G., Martynov A. A. Otsenka parametrov agregata turbonadduva porshnevoego transportnogo dvigatelya na baze bezmotornykh ispytaniy [Evaluation of turbocharging unit parameters in a piston vehicle engine vehicle through motorless tests] // Transport of the Urals. 2015. № 3 (46). S. 74–78. ISSN 1815-9400.
8. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P., Brodov Yu. M. Eksperimentalnoe issledovanie i sovershenstvovanie protsessov gazoobmena porshnevnykh i kombinirovannykh DVS v usloviyakh gazodinamicheskoy nestatsionarnosti [Experimental study and improvement of gas exchange processes in reciprocating and combined internal combustion engines in the context of gas-dynamic unsteadiness] // Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy, Ser. Mashinostroenie. 2015. № 12 (669). S. 35–44. ISSN 0536-1044.

УДК 629.113.002.3.004

Никита Владимирович Савенков, ассистент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство»
Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДонНАСА), Макеевка

ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЯ КАТЕГОРИИ N_1 ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Nikita Vladimirovich Savenkov, Assistant Lecturer, Department of Automobiles and Automobiles Economy,
Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA), Makeevka

Improvement of fuel efficiency of the N_1 category vehicle by optimization of power plant parameters

Аннотация

Одно из наиболее эффективных направлений по снижению эксплуатационных затрат автомобиля — повышение его топливной экономичности путем согласования режимных параметров двигателя и конструкционных параметров трансмиссии в соответствии с режимами движения.

В статье предложен метод повышения топливной экономичности автомобиля категории N_1 за счет оптимизации параметров его силовой установки. Разработанный метод позволяет на основе численного моделирования процесса движения автотранспортного средства с учетом динамики неустановившихся режимов, протекающих в его агрегатах, устанавливать такое соответствие режимных и конструкционных параметров силовой установки, при котором достигается минимальный расход топлива в условиях заданного стандартизированного ездового цикла.

Ключевые слова: топливно-экономические свойства автомобиля, ездовой цикл, оптимизация, параметры оптимизации, силовая установка, двигатель внутреннего сгорания, коробка передач, передаточные числа, скоростные характеристики двигателя, мощность сопротивления движению, режимы движения.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-108-113

Summary

One of the most effective ways to reduce vehicle operating costs is to increase its fuel efficiency by harmonizing operating parameters of the engine and design parameters of the power train in accordance with the driving mode.

This paper proposes a method to improve fuel efficiency of the N_1 category vehicle by optimizing the parameters of its power plant. The developed method is based on numerical simulation of vehicle movement, taking into account the dynamics of transient regimes in its components, and allows to match operating and design parameters of its power plant to reach minimum fuel consumption under a given standardized driving cycle.

Keywords: fuel-economic performance of a car, driving cycle, optimization, optimization of parameters, power plant, internal combustion engine, gearbox, transmission ratios, engine speed characteristics, resistance to motion, driving modes.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-108-113

Конкурентоспособность и экономическая эффективность эксплуатации автомобиля определяются множеством параметров, основные среди которых — удельная производительность, комплексная безопасность, долговечность, безотказность и топливная экономичность.

Для оценки общего влияния этих параметров на экономическую эффективность эксплуатации автомобиля может быть применен комплексный критерий — величина эксплуатационных затрат, отнесенная к единице выполненной транспортной работы [1]. Одно из эффективных направлений по снижению данной величины — повышение топливной экономичности [1, 2].

Понятие топливной экономичности автомобиля является обобщенным и включает в себя совокупность оценочных показателей, от которых зависит потребление топлива в определенных эксплуатационных условиях [3–5].

С позиции технической эксплуатации топливно-экономическая эффективность автомобиля определяется, как правило, средним значением путевого расхода топлива. Для автотранспортных средств (АТС) категорий N_1 и M_1 данный параметр может быть представлен в виде топливно-экономической характеристики (ТЭХ) установившегося движения при различных значениях коэффициентов сопротивления качению [5], а также в виде среднего значения, полученного в условиях набора последовательных режимов движения (ездового цикла) в ходе стендовых или дорожных испытаний [3, 4, 6].

Последний вариант определения путевого расхода топлива как оценочного критерия относительной топливной экономичности считается в мировой практике наиболее приоритетным, поскольку кроме движения с постоянными скоростями позволяет учитывать и другие характерные для нормальных условий эксплуатации режимы движения автомобиля: разгон, работу двигателя в режиме принудительного холостого хода и без нагрузки. С позиции энергетической эффективности этот удельный оценочный показатель m_{ai} (суммарная масса топлива, израсходованного автотранспортным средством за ездовой цикл) целесообразно рассматривать в виде массового расхода, так как требуемая в каждом конкретном случае

величина работы для двигателя пропорциональна массовому количеству израсходованного топлива (обусловлена его низкой теплотой сгорания):

$$m_{al} = \int_0^{t_{\text{ц}}} G dt, \text{ г/ездовой цикл}, \quad (1)$$

где G — массовый расход топлива, г/с;

$t_{\text{ц}}$ — общее время движения в ездovém цикле (ЕЦ), с.

Соответственно разработка мероприятий, направленных на снижение данного показателя, является приоритетной задачей при проектировании и эксплуатации АТС.

Известно, что расход топлива автомобиля в заданных эксплуатационных условиях определяется рядом факторов — массой, формой кузова, характеристиками двигателя, трансмиссии и ходовой части [5]. Массогабаритные параметры, форму кузова и конфигурацию ходовой части можно отнести к инерционно-диссипативным конструкционным параметрам автомобиля, которые ключевым образом влияют на процессы расхода энергии для выполнения транспортной работы.

Вторая группа факторов, влияющих на расход топлива, — эффективные характеристики двигателя, кинематические и динамические характеристики трансмиссии. Они, наоборот, определяют механическую мощность, трансформацию и передачу ее составляющих к ведущим колесам, а также сопутствующие при этом потери энергии, которые являются весьма существенными. Например, общий КПД двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и механической трансмиссии при различных режимах движения может варьироваться в пределах 0,05–0,35 [5, 7]. Таким образом, улучшение удельной топливной экономичности автомобиля следует ожидать за счет увеличения КПД та-

ких его узлов, агрегатов и систем, для которых характерны наибольшие потери энергии. У мобильных транспортных средств таковыми являются двигатель и трансмиссия [7].

Традиционное для практики мирового автомобилестроения направление, которое заключается в применении более совершенных в отношении энергетической эффективности агрегатов и узлов, характеризуется существенным удорожанием итоговой стоимости АТС и усложнением его конструкции [1].

Известно также другое направление, предусматривающее повышение топливной экономичности автомобиля за счет увеличения среднеексплуатационного значения общего КПД двигателя и трансмиссии путем согласования их характеристик обеспечением рациональных режимов работы. Научно-практическая реализация этого направления представляет собой задачу оптимизации, которая при комплексном подходе требует, во-первых, наличия методики математического моделирования процесса движения автомобиля, основанной на функциональных зависимостях характеристик двигателя и трансмиссии, а во-вторых, сопряжена с определенными сложностями связи текущих значений режимных параметров силовой установки (двигателя и коробки передач) с параметрами режима движения автомобиля. Решение этих вопросов невозможно без создания соответствующих методов и средств для экспериментальной оценки изучаемых процессов [8, 9].

На рис. 1 приведена блок-схема разработанного метода оптимизации, которая состоит из последовательного выполнения 5 блоков (модулей). В первом блоке осуществляется постановка задачи оптимизации — выбор соответствующего критерия, определение параметров оптимизации, а также выбор режимных условий эксплуатации (ездового цикла).



Рис. 1. Структурная схема метода оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии

Для легких коммерческих АТС (LCV — light commercial vehicle), принимая во внимание их относительно невысокую энерговооруженность по сравнению с легковыми автомобилями, в качестве критерия оптимизационной задачи может быть выбран показатель m_{al} из формулы (1), который позволяет комплексно учитывать не только топливно-экономические, но и необходимые для движения в условиях ЕЦ тягово-скоростные свойства. Учет дополнительных критериев, таких как среднее время преодоления мерного участка пути [10], среднее значение динамического фактора в заданном диапазоне скоростей [11], стоимость возмещения экологического ущерба [12], удельная концентрация вредных веществ в отработавших газах [13] и т. д., может быть предусмотрен на этапе корректировки полученных результатов.

При решении задач согласования характеристик ДВС и трансмиссии в качестве оптимизационных параметров традиционно принимаются передаточные числа (ПЧ) трансмиссии. При движении автомобиля они обуславливают функции режимных параметров силовой установки (СУ), которыми в итоге определяется его топливная экономичность.

Таким образом, в разработанном методе оптимизации в качестве оптимизационных параметров выступают ПЧ высших передач, поскольку значение ПЧ первой передачи определено возможностью преодоления заданного максимального сопротивления движению [5]. Для автомобилей, оснащенных механической коробкой передач (КП), рассматриваемая постановка задачи является одной из наиболее результативных с точки зрения соотношения трудоемкости и стоимости модернизации, с одной стороны, и полученной в итоге экономической эффективности в заданных эксплуатационных условиях — с другой.

Для оценки топливной экономичности АТС категории N₁ в РФ применяется Новый европейский ездовой цикл (NEDC) [3, 4, 6]. Таким образом, критерий оптимизации с учетом принятых оптимизационных параметров и выбранного ЕЦ определяется набором целевых функций, причем каждая функция обуславливает массовое количество израсходованного автомобилем топлива за те участки ЕЦ, движение на которых осуществлялось на передаче m в КП:

для фрагмента ECE-15, из которых состоит ездовой цикл UDC:

$$m_{al(2)} = \int_{56}^{61} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{61}^{85} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{85}^{93} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt + \int_{124}^{133} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{178}^{185} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt; \quad (2)$$

$$m_{al(3)} = \int_{135}^{143} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{143}^{155} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{155}^{163} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt + \int_{163}^{176} G(t, U_{(m)}) dt; \quad (3)$$

для магистрального ездового цикла EUDC low power vehicle:

$$m_{al(4)} = \int_{48}^{61} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{61}^{111} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{111}^{119} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt + \int_{119}^{188} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{188}^{201} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{251}^{275} G(t, U_{(m)}) dt; \quad (4)$$

$$m_{al(5)} = \int_{201}^{251} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{275}^{358} G(t, U_{(m)}) dt + \int_{358}^{362} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt + \int_{362}^{370} G_{ПХХ}(t, U_{(m)}) dt, \quad (5)$$

где $U_{(m)}$ — ПЧ передачи m КП;

$G_{ПХХ}$ — функция массового расхода топлива ДВС в режиме принудительного холостого хода, г/с.

В уравнениях (2)–(5) пределы интегрирования приведены в секундах.

Соответственно если каждое значение ПЧ будет обеспечивать минимальное суммарное потребление топлива $m_{al(m)}$ на тех участках ЕЦ, движение на которых сопровождается включенной передачей m , то и общее количество топлива m_{al} (1), затраченное автомобилем для прохождения ЕЦ, будет также минимальным.

Оптимальные значения $U_{(m)}$ для рассматриваемых передач m определяются при минимальных значениях соответствующих функций (2)–(5):

$$U_{(m)O} = U_{(m)} \Leftrightarrow \begin{cases} d(m_{al(m)}(U_{(m)})) / d(U_{(m)}) = 0; \\ m = 2, 3, 4, 5; \\ N_e = N_T / \eta_{КП} \end{cases}, \quad (6)$$

где $U_{(m)O}$ — искомое оптимизированное значение ПЧ передачи m КП;

N_e — развиваемая ДВС эффективная мощность;

N_T — мощность сопротивления движению автомобиля в условиях ЕЦ, приведенная к ведомому валу СУ;

$\eta_{КП}$ — КПД коробки передач.

Граничные условия оптимизации приведены в последних строчках выражения (6) — фиксированное число передач и выполнение баланса мощности в трансмиссии.

Во втором блоке алгоритма (см. рис. 1) осуществляется ввод математических моделей характеристик автомобиля — скоростных характеристик N_e и эффективного удельного расхода топлива g_e ДВС, потерь в трансформаторе крутящего момента $\eta_{КП}$, а также мощности сопротивления движению N_T .

Скоростные характеристики ДВС представлены зависимостями:

$$N_e = f(n, \lambda, \varepsilon, \delta); \quad (7)$$

$$g_e = f(n, \lambda, \varepsilon, \delta), \quad (8)$$

где n — частота вращения коленчатого вала;

λ — коэффициент нагрузки ДВС (относительная эффективная площадь дроссельного патрубка);

ε — угловое ускорение коленчатого вала;

δ — скорость изменения нагрузки ($\delta = d\lambda/dt$).

Принятое в соответствии с рекомендациями [8] функциональное определение скоростных характеристик ДВС [формулы (7), (8)], в отличие от традиционного $N_e = f(k, n)$, $g_e = f(k, n)$, где k — коэффициент использования мощности, т. е. показатель доли частичной нагрузки от полной, $k = N_e/N_{e(BCX)} = M_e/M_{e(BCX)}$ [6], позволяет учесть влияние неустановившихся режимов работы, которое для поршневых ДВС является относительно существенным [8, 13].

Ввиду сложности теоретического расчета скоростных характеристик по функциональным зависимостям (7), (8) в настоящей работе они определены экспериментальным путем. Для этой цели в качестве примера был выбран автомобиль ГАЗ-3302 с двигателем УМЗ-4216 (Евро-3). При оценке мощностных и экономических показателей ДВС применялся модернизированный обкаточно-тормозной стенд КИ-5543. Величины N_e на неустановившихся режимах работы были определены относительно безынерционно с помощью разработанного трансмиссионного динамометра [14], размещенного в трансмиссии (рис. 2).

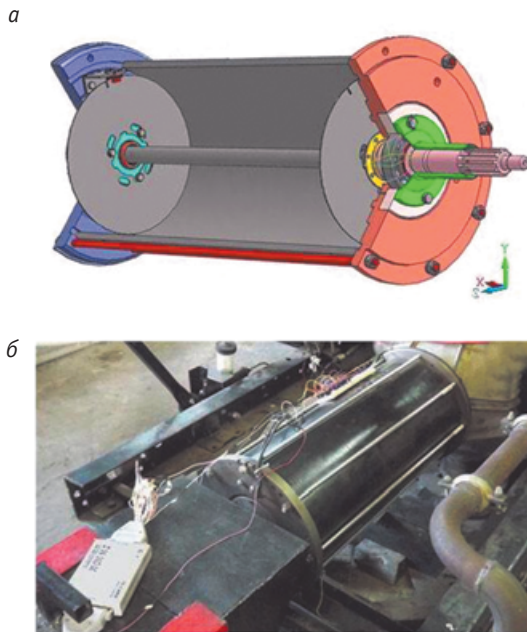


Рис. 2. Торсионный динамометр:

а — графическая модель; б — рабочее положение в трансмиссии тормозного стенда с подключенной автоматизированной системой сбора данных

Основные результаты стендовых испытаний — аппроксимирующие зависимости для скоростных характеристик N_e и g_e — приведены на рис. 3.

На рис. 4 показана зависимость коэффициента использования мощности k от коэффициента нагрузки λ .

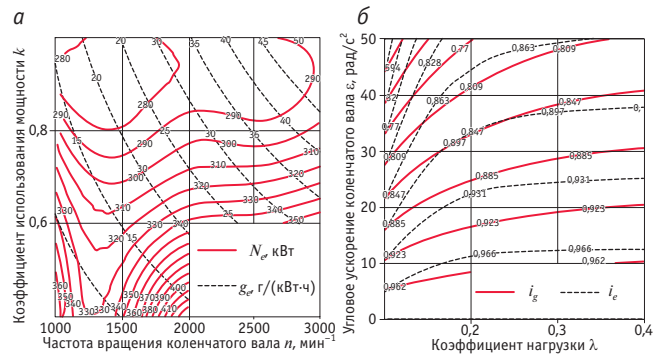


Рис. 3. Скоростные характеристики ДВС УМЗ-4216:

а — диаграмма N_e и g_e при работе на установившемся режиме;

б — диаграмма коэффициентов для учета неустановившихся режимов

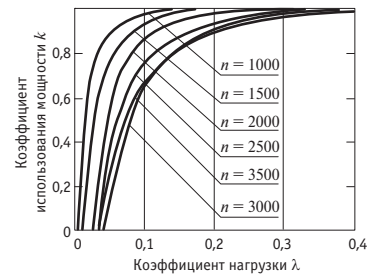


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования мощности от коэффициента нагрузки (ДВС УМЗ-4216)

Таким образом, по результатам выполненных стендовых испытаний скоростные характеристики ДВС с учетом неустановившихся режимов работы ($\varepsilon > 0$ и/или $\delta > 0$) могут быть представлены зависимостями:

$$N_e(n, \lambda, \varepsilon, \delta) = i_\varepsilon(\lambda, \varepsilon) \cdot i_{\delta e}(\delta) \cdot N_e(n, \lambda); \quad (9)$$

$$g_e(n, \lambda, \varepsilon, \delta) = \frac{g_e(n, \lambda)}{i_g(\lambda, \varepsilon) \cdot i_{\delta g}(\delta)}, \quad (10)$$

где $i_\varepsilon(\lambda, \varepsilon)$, $i_{\delta e}(\delta)$ — соответственно функции снижения крутящего момента при разгоне и при изменении нагрузки;

$i_g(\lambda, \varepsilon)$, $i_{\delta g}(\delta)$ — соответственно функции изменения удельного расхода топлива при разгоне и при изменении нагрузки.

Функции $i_{\delta e}(\delta)$ и $i_{\delta g}(\delta)$ по результатам экспериментальных исследований для испытуемого ДВС аппроксимированы выражениями:

$$i_{\delta e}(\delta) = 1 - 0,0893 \cdot \delta - 2,214 \cdot \delta^2; \quad (11)$$

$$i_{\delta g}(\delta) = 1 - 2,562 \cdot \delta. \quad (12)$$

Для определения условно-мгновенного расхода топлива ДВС на неустановившемся режиме использована методика [15].

Как показано на рис. 3б, при работе ДВС на неустановившихся режимах в общем случае отмечается ухудшение его эффективных характеристик по сравнению с соответствующими значениями на стационарных режимах.

Работа автомобильного двигателя в составе СУ, как правило, сопровождается потерями мощности в трансформаторе крутящего момента. Для механической ступенчатой КП характерен относительно небольшой диапазон изменения КПД. Это позволило с незначительными допущениями на основании методики [16] представить КПД КП для рассматриваемого в качестве примера АТС выражением

$$\eta_{\text{КП}} = \{0,957 \text{ при } m = 2,3,5; 0,985 \text{ — при } m = 4\}.$$

Вопросы, связанные с относительно достоверным учетом влияния неустановившихся режимов движения АТС на расход развиваемой СУ мощности, требуют также преимущественно экспериментального рассмотрения. На рис. 5 приведена характеристика сопротивления движению $N_T = f(V, j)$, где V — скорость движения автомобиля, м/с; j — продольное ускорение автомобиля, м/с². Данные получены в ходе дорожных испытаний.

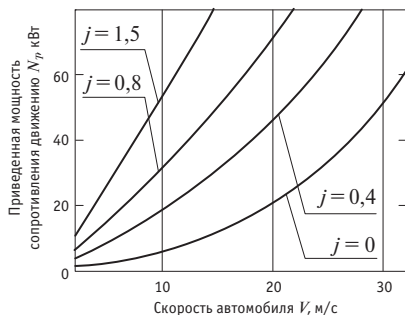


Рис. 5. Характеристика мощности сопротивления движению (автомобиль ГАЗ-3302, испытательная масса 2750 кг, горизонтальное шоссе)

Для определения величины N_T в трансмиссии автомобиля вместо промежуточного карданного вала был размещен прибор, аналогичный по конструкции динамометру, который использовался при стендовых исследованиях.

Таким образом, зависимость $N_T = f(V, j)$ можно рассматривать как характеристику самого АТС, которая объединяет затраты мощности на преодоление сил сопротивления движению с потерями в агрегатах привода и ходовой части с учетом динамики процесса разгона.

В третьем блоке алгоритма (см. рис. 1) решается задача оптимизации путем анализа на экстремум целевых функций критерия (2)–(5). На рис. 6 приведены графики функций вида (2)–(5), полученные при численном моделировании процесса движения. Маркерами на кривых показаны оптимизированные значения ПЧ $U_{(m)O}$.

Вертикальные пунктирные линии на рис. 6 соответствуют ПЧ серийной КП. Для второй передачи оптимальное значение ПЧ совпадает с минимумом целевой функции. Для остальных передач выше второй оптимум достаточно удален от экстремума. Характер функции $m_{al(3)}$ позволяет выделить диапазон $\{1,2 < U_{(3)} < 1,3\}$, в котором рост ПЧ не приводит к значительному увеличению m_{al} . Это позволяет повысить тягово-скорост-

ные свойства АТС без соизмеримого ухудшения топливно-экономических свойств.

В табл. 1 представлены результаты решения задачи оптимизации. Для сопоставления приведены ПЧ КП серийного автомобиля ($U_{(m)C}$), оптимизированный ($U_{(m)O}$) и рекомендуемый ряд ПЧ КП ($U_{(m)P}$). Следует отметить, что построение рекомендуемого ряда осуществляется в четвертом блоке алгоритма (см. рис. 1), этот ряд отличается возможностью практической реализации с учетом кинематических, геометрических и прочностных требований КП.

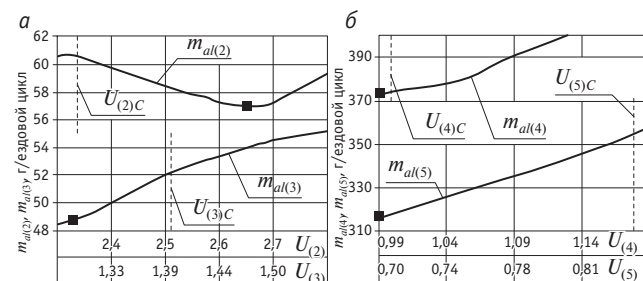


Рис. 6. Значения критерия оптимизации $m_{al(m)}$ от передаточного числа КП:

а — вторая и третья передачи; б — четвертая и пятая передачи

Таблица 1

Основные результаты решения задачи оптимизации

	Передаточные числа					Расход топлива m_{al} (г/ЕЦ)/(л/100 км)		
	1	2	3	4	5	ECE-15	EUDC low power vehicle	NEDC
$U_{(m)C}$	4,05	2,34	1,395	1	0,849	154/21	793/15,8	1409/17,8
$U_{(m)O}$	4,05	2,65	1,3	0,99	0,7	146,67/20	748/14,9	1335/16,87
$U_{(m)P}$	4,05	2,63	1,305	1	0,738	147/20,15	759/15,2	1347/17

На рис. 7 в качестве примера показаны зависимости эффективного КПД ДВС при движении АТС в условиях городской составляющей ЕЦ NEDC.

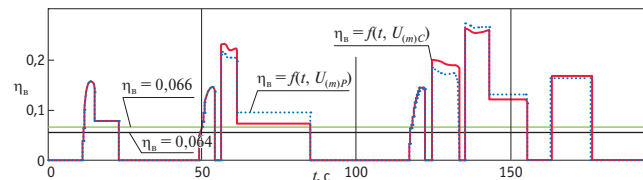


Рис. 7. Эффективный КПД ДВС при движении автомобиля ГАЗ-3302 с серийным и рекомендуемым рядами передаточных чисел КП в городском ездовом цикле (фрагмент ECE-15)

Таким образом, повышение топливной экономичности автомобиля в ЕЦ обусловлено организацией режимов работы его СУ, при которой увеличивается среднее значение эффективного КПД ДВС.

Рассматриваемый в статье метод повышения топливной экономичности основан на блочно-модульной структуре процесса согласования характеристик ДВС и трансмиссии. Такая структура предусматривает независимый анализ влияния оптимизационных параметров на частные составляющие оценочного критерия, кроме того, она позволяет в отличие от известных методов построения ряда ПЧ учитывать

неустановившиеся режимы работы агрегатов СУ, трансмиссии и ходовой части.

На основе результатов исследований для автомобиля ГАЗ-3302, выбранного в качестве примера, рекомендован ряд передаточных чисел КП, который обеспечивает повышение топливной экономичности в ездовом цикле NEDC на 4,42 % по сравнению с рядом ПЧ серийной КП.

Литература

1. Карбанович И. И. Экономия автомобильного топлива: опыт и проблемы. М. : Транспорт, 1992. 145 с.
2. Токарев А. А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. М. : Машиностроение, 1982. 224 с.
3. ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2012. 23 с.
4. ГОСТ Р 41.101–99 (Правила ЕЭК ООН № 101). М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001.
5. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств : учеб. для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». М. : Машиностроение, 1989. 240 с.
6. ГОСТ Р 41.84–99 (Правила ЕЭК ООН № 84). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения дорожных транспортных средств, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения потребления топлива. М. : Стандартинформ, 2005. 36 с.
7. Соловьев А. И. Коэффициент полезного действия механизмов и машин. М. : Машиностроение, 1966. 179 с.
8. Работа автомобильного двигателя на неустановившемся режиме / Е. М. Акатов, П. М. Белов, Н. Х. Дьяченко и др. М. ; Л. : Mashgiz, 1960. 282 с.
9. Shupe D. S. Updates: Automobile Fuel Economy // Mechanical Engineering. 1977. Vol. 99. No. 12.
10. Русаков С. С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск : ИжГТУ, 2007. 134 с.
11. Горожанкин С. А., Савенков Н. В. Исследование влияния передаточных чисел промежуточных передач дискретной трансмиссии на топливную экономичность автомобиля // Наукові нотатки. 2012. № 36. С. 62–68.
12. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия : монография. Харьков : Издательский центр НТУ «ХПИ», 2003. 244 с.
13. Попов Д. В. Улучшение экологических показателей автомобилей с нейтрализаторами при использовании бензинов с добавками биоэтанола : дис. ... канд. техн. наук. Киев : НТУ, 2008. 200 с.
14. Пристрій для виміру крутного моменту на обертовому валу з мінливою частотою / С. А. Горожанкін, В. В. Криволап, М. В. Савенков, А. С. Валева : пат. 72893 Україна. Заявл. 03.04.12 ; опубл. 27.08.12, Бюл. № 4.
15. Савенков Н. В., Горожанкин С. А. Определение расхода топлива бензинового ДВС с рампой тупикового типа при работе на переходных режимах // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. 2013. № 15 (204). Ч. 2. С. 268–274.
16. Кудрявцев В. Н. Зубчатые передачи. М. ; Л. : Mashgiz, 1957. 263 с.

References

1. Karbanovich I. I. Ekonomiya avtomobilnogo topliva: opyt i problemy [Auto fuel economy: experience and problems]. M. : Transport, 1992. 145 s.
2. Tokarev A. A. Toplivnaya ekonomichnost i tyagovo-skorostnye kachestva avtomobilya [Fuel economy and towing and speed characteristics of the car]. M. : Mashinostroenie, 1982. 224 s.
3. GOST R 54810–2011. Avtomobilnye transportnye sredstva. Toplivnaya ekonomichnost. Metody ispytaniy [Automotive vehicles. Fuel efficiency. Test methods]. M. : Standartinform, 2012. 23 s.
4. GOST R 41.101–99 (Pravila EEK OON № 101) [(UNECE Regulations No. 101)]. M. : IPK Izd-vo standartov, 2001.
5. Litvinov A. S., Farobin Ya. E. Avtomobil: teoriya ekspluatatsionnykh svoystv : ucheb. dlya vuzov po spetsialnosti «Avtomobili i avtomobilnoe khozyaystvo» [Motor vehicle: theory of performance characteristics : a textbook for students of universities specializing in «Motor cars and car fleet»]. M. : Mashinostroenie, 1989. 240 s.
6. GOST R 41.84–99 (Pravila EEK OON № 84). Edinobraznye predpisaniya, kassyushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya dorozhnykh transportnykh sredstv, oborudovannykh dvigatelem vnutrennego sgoraniya, v otnoshenii izmereniya potrebleniya topliva [(UNECE Regulations No. 84). Uniform provisions concerning the approval of road vehicles equipped with internal combustion engine with respect to measurement of fuel consumption]. M. : Standartinform, 2005. 36 s.
7. Solov'yov A. I. Koeffitsient poleznogo deystviya mekhanizmov i mashin [Coefficient of efficiency of mechanisms and machines]. M. : Mashinostroenie, 1966. 179 s.
8. Rabota avtomobilnogo dvigatelya na neustanovivshemysya rezhime [Car engine operation in transient mode] / E. M. Akatov, P. M. Belov, N. Kh. Dyachenko i dr. M. ; L. : Mashgiz, 1960. 282 s.
9. Shupe D. S. Updates: Automobile Fuel Economy // Mechanical Engineering. 1977. Vol. 99. No. 12.
10. Rusakov S. S. Razrabotka metodiki optimizatsii peredatochnykh chisel mekhanicheskoy stupenchatoy transm issii legkovogo avtomobilya s uchyotom rezhimov raboty ego dvigatelya : dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for optimization of transmission ratios of a fixed-ratio mechanical transmission of a motor car depending on engine operation mode : PhD in Engineering Thesis]. Izhevsk : IzhGTU, 2007. 134 s.
11. Gorozhankin S. A., Savenkov N. V. Issledovanie vliyaniya peredatochnykh chisel promezhutochnykh peredach diskretnoy transm issii na toplivnyuyu ekonomichnost avtomobilya [Study of the effect of intermediate gear ratios of discrete transmission on vehicle fuel economy] // Naukovi notatki. 2012. № 36. С. 62–68.
12. Parsadanov I. V. Povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteria : monografiya [Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on comprehensive fuel and environmental criteria : a monograph]. Kharkov : Izdatelskiy tsentr NTU «KhPI», 2003. 244 s.
13. Popov D. V. Uluchshenie ekologicheskikh pokazateley avtomobiley s neytralizatorami pri ispolzovanii benzinov s dobavkami bioetanola : dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of environmental performance of automobiles with catalytic converters through the use of gasoline with bioethanol additives : PhD in Engineering Thesis]. Kiev : NTU, 2008. 200 s.
14. Pristriy dlya vimiru krutnogo momentu na obertovomu valu z minlivoyu chastotoy / S. A. Gorozhankin, V. V. Krivolap, M. V. Savenkov, A. S. Valevach : pat. 72893 Ukraina. Zayavl. 03.04.12 ; opubl. 27.08.12, Byul. № 4.
15. Savenkov N. V., Gorozhankin S. A. Opredelenie raskhoda topliva benzinovogo DVS s rampoy tupikovogo tipa pri rabote na perekhodnykh rezhimakh [Determination of fuel consumption of a petrol combustion engine with blind-type ramp during operation in transient modes] // Vestnik Vostochnoukrainskogo natsionalnogo universiteta imeni Vladimira Dalya. 2013. № 15 (204). Ch. 2. S. 268–274.
16. Kudryavtsev V. N. Zubchatye peredachi [Gears]. M. ; L. : Mashgiz, 1957. 263 s.

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> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2016 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> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2016 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

¹ 1 (48), 2016 год

Издается с июня 2004 г.

Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс: 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство ПИ 77-18098

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.transporturala.usurt.ru>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Учредитель:

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)

Главный редактор:

Александр Васильевич Ефимов

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

Перевод:

Элеонора Рашитовна Яхина

(департамент международных связей УрГУПС), тел. (343) 221-24-86

Автор фотографии на обложке:

Наталия Викторовна Ладейщикова

С 1 января 2007 г. журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписано в печать 28.03.16

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2016

