

**ТЕХНОЛОГИЯ МАКРОМДЕЛИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ**

**МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТРАМВАЯ
С РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕЕЙ НА ВТОРОЙ ФАЗЕ
ПРОХОЖДЕНИЯ ВАГОНОМ СТЫКОВОЙ НЕРОВНОСТИ**

**ВИБРОПОГРУЖЕНИЕ СВАЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕРАВНОВЕСНЫХ КОЛЕБАНИЙ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

**ПРЕДЕЛЬНАЯ
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ
ЗАКРУЧИВАЕМЫХ ВАЛОВ
ИЗ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ
МАТЕРИАЛА**

**МЕТОД ЛИНЕЙНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ
В ИССЛЕДОВАНИИ КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛЕЖКИ
ТИПА 18-100 В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ**

**ФИЛЬТРУЮЩАЯ ПОЛОСА
В СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ**



TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Ефимов, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александр Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Сileszский 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, профессор, научный редактор, Екатеринбург
2. Боровских Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, 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. Резник Леонид Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, Тюмень
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск

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, professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borovskikh Alexander Mikhaylovich, PhD, 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. Reznik Leonid Grigorievich, DSc, professor, Tumen
11. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Umnyashkin Vladimir Alexeyevich, DSc, professor, Izhevsk
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. Ю. Пермикин, И. Г. Слободянюк.	
Технология макромоделирования транспортных узлов	3
В. П. Шпачук, А. А. Чупрынин, Т. А. Супрун. Механическое взаимодействие трамвая с рельсовой колеей на второй фазе прохождения вагоном стыковой неровности	7
М. В. Нечипорук, В. А. Анисимов. К вопросу использования сбалансированной системы показателей при моделировании взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в мультимодальном транспортном узле.....	13

ИСТОРИЯ ТРАНСПОРТА

А. А. Конов. Реализация Генерального плана электрификации железнодорожного транспорта на Урале в 1956–1970 гг.	18
---	----

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

Х. Т. Туранов, С. А. Ситников, А. А. Гордиенко. Математическое описание устойчивости груза и вагона с грузом при наличии поперечного сдвига.....	24
--	----

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

С. А. Румянцев, К. Ю. Астанков, В. А. Ермаков. Вибропогружение свай с использованием неравновесных колебаний различных типов.....	29
---	----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

В. В. Стручанов, Е. А. Бахарева. Предельная несущая способность закручиваемых валов из разупрочняющегося материала.....	35
---	----

И. А. Добычин, М. Ю. Градинаров. Метод линейных наблюдателей в исследовании конфигурации тележки типа 18-100 в процессе движения....	41
--	----

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Д. И. Хомич. Определение потребности в тяговых ресурсах при проведении работ на объектах инфраструктуры железных дорог России	49
---	----

Р. Г. Король, А. С. Балалаев. Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока.....	53
--	----

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Д. В. Ефанов. Метод автоматизации проверки логики функционирования объектов диагностирования в системах удаленного контроля и мониторинга	58
---	----

О. Н. Пашченко, Н. К. Велигжанин. Увеличение дальности и качества связи по электрическим цепям	63
--	----

С. В. Бушаев, М. Л. Ускова, А. Н. Попов. Оценка влияния систем технической диагностики и мониторинга на надежность работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации.....	68
---	----

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

А. М. Асонов, О. Р. Ильясов, Г. М. Борисова. Фильтрующая полоса в составе железнодорожной насыпи.....	73
---	----

В. Я. Бершадский. О направлениях решения экологической проблемы использования железнодорожных шпал	78
--	----

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

С. А. Войнаш, А. С. Войнаш, А. С. Демидов. Повышение проходимости и маневренности фермерского малотоннажного грузовика	86
--	----

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин. Пути повышения энергоэффективности на Малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов	90
--	----

Э. Ш. Мурадов. Гибридный быстродействующий автоматический выключатель на номинальный ток 250 А	95
--	----

Ю. А. Коучунов. Аналитическое определение прочности стеклопластикового кронштейна проводов для линий продольного электроснабжения	102
---	-----

М. А. Гаранин, С. А. Блинкова. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения	109
--	-----

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Д. Г. Неволин, В. Л. Новоселов. Комплекс оборудования для испытаний тормозных систем с электропневмоприводом транспортных средств категорий О ₂ , О ₃ , О ₄	115
--	-----

Д. Г. Неволин, В. Л. Новоселов. Математическое моделирование динамического процесса в подвеске полуприцепа.....	119
---	-----

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

P. A. Kozlov, N. A. Tushin, V. Yu. Permikin, I. G. Slobodyanyuk. Transport hub macromodelling technology	3
V. P. Shpachuk, A. A. Chuprynin, T. A. Suprun. Mechanical interaction of tram and track in the second phase of vehicle passing through joint irregularities.....	7
M. V. Nechiporuk, V. A. Anisimov. Regarding the use of balanced scorecard in modeling of interaction between rail and sea transport in a multimodal transport hub.....	13

HISTORY OF TRANSPORT

A. A. Konov. Implementation of Railway Transport Electrification Master Plan in the Urals in 1956–1970	18
--	----

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

Kh. T. Turanov, S. A. Sitnikov, A. A. Gordienko. Mathematical description of stability of cargo and carload in the presence of transverse slippage.....	24
---	----

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

S. A. Rumyantsev, K. Yu. Astankov, V. A. Ermakov. Vibration driving of piles using different types of non-equilibrium oscillations	29
--	----

ROLLING STOCK AND TRACTION

V. V. Struzhanov, E. A. Bakhareva. Ultimate bearing capacity of torsion shafts made of softening material	35
---	----

I. A. Dobychin, M. Yu. Gradinarov. Linear observers method in the study of type 18-100 bogie configuration in the movement	41
--	----

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

D. I. Khomich. Determining the need for traction resources when carrying out works at the facilities of Russian railway infrastructure.....	49
---	----

R. G. Korol, A. S. Balalaev. Simulation of port railway station operation using probabilistic and statistical approach to change in incoming traffic parameters	53
---	----

AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION

D. V. Efanson. Method for automated verification of operation logic of tested units in telemechanics and monitoring systems	58
---	----

O. N. Pashchenko, N. K. Veligzhanin. Extending the range and quality of communication via electric circuits	63
---	----

S. V. Bushaev, M. L. Uskova, A. N. Popov. Impact assessment of technical diagnosis and monitoring systems on performance reliability of railway automation and telemechanics devices in operation.....	68
--	----

TECHNOSPHERIC SAFETY

A. M. Asonov, O. R. Ilyasov, G. M. Borisova. Filter strip as a part of railway embankments.....	73
---	----

V. Ya. Bershadsky. Ways to solve the environmental problem of using railway sleepers	78
--	----

TRANSPORT MACHINERY

S. A. Voynash, A. S. Voynash, A. S. Demidov. Increasing of cross-country ability and maneuverability of farm light trucks	86
---	----

ELECTRIC SUPPLY

A. S. Vilgelm, V. L. Nezevak, V. T. Cheremisin. Ways to improve energy efficiency on the Small Ring of Moscow Railway with the help of inverters	90
--	----

E. Sh. Muradov. Hybrid quick-break circuit breaker with rated current 250 A	95
---	----

Yu. A. Kochunov. Analysis of the strength of glass-fiber wire bracket for longitudinal power lines	102
--	-----

M. A. Garanin, S. A. Blinkova. Analysis of power supply status of transportation process and improvement of traction power system	109
---	-----

MOTOR TRANSPORT

D. G. Nevolin, V. L. Novoselov. Equipment for testing electropneumatic brake systems for О ₂ , О ₃ , О ₄ category vehicles	115
---	-----

D. G. Nevolin, V. L. Novoselov. Mathematical modeling of dynamic process in semitrailer suspension	119
--	-----

УДК 656.212.5

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Москва,
 Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Инна Геннадьевна Слободянюк, директор по финансам и экономике холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Екатеринбург

ТЕХНОЛОГИЯ МАКРОМДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ

Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow,
 Nikolay Andreyevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Vadim Yuryevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Inna Gennadyevna Slobodyanyuk, Director for Finance and Economics, Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Ekaterinburg

Transport hub macromodelling technology

Аннотация

Существующие принципы моделирования предусматривают детальное структурное описание транспортного объекта. Для крупных объектов, к которым относятся транспортные узлы, предлагается применять аппарат макромоделирования, основанный на функциональном подходе. В статье изложены принципы макромоделирования горловин, парков станций и технологических процессов в транспортных узлах.

Ключевые слова: модель, транспорт, станция, узел, имитация.

Summary

Existing modeling principles provide for detailed structural description of a transport facility. For large facilities, including transport hubs, the macromodelling framework based on a functional approach is proposed. The article outlines the principles for macromodelling of necks, station parks and transport hub processes.

Keywords: model, transport, station, hub, simulation.

1. ПРОБЛЕМА

Имитационное моделирование обычно предполагает детальное описание структуры транспортного объекта. Это вполне объяснимо по трем причинам.

Первая — как правило, моделируются не очень крупные объекты. На железнодорожном транспорте это обычно станции, в структуре которых несколько десятков путей и две-три сотни стрелок.

Вторая — сложное взаимодействие структуры и потоков не поддается строгому математическому описанию, поэтому укрупнять элементы структуры опасно.

Третья — задачи моделирования, которые обычно сводятся к оценке проектируемой станции. То есть проектировщику нужно дать детальную оценку проекта, вплоть до каждой стрелки [1].

При моделировании крупных транспортных узлов, включаяющих два и более десятков станций, морские терминалы, перегрузочные склады и т.п., эти три причины несущественны. В данном случае важно оценить, насколько гармонично структура узла соответствует распределению работы и принятой технологии. Однако при этом необходимо учитывать вместимость парков путей и складов, пропускную способность горловин и перерабатывающую способность терминалов.

Для моделирования транспортных узлов нужны соответствующий аппарат и методология. В макромоделировании при представлении в модели объекта вместо структурного подхода применяется функциональный. Описывается не собственно структура горловин, парков, станций, а их функциональные возможности.

В настоящей статье рассматривается технология, реализованная в системе моделирования ИМЕТРА.

2. ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЛОВИН

Микромоделирование горловин — это детальное отображение их структуры, вплоть до каждой стрелки. Наложение на структуру технологии с потоками позволит не только определить пропускную способность горловины, но и получить загрузку каждой стрелки и вызываемые ею задержки. То есть модель выдаст всю информацию проектировщику для оценки и улучшения проектных решений [2, 3].

В случае макромоделирования стоит задача учесть в модели лишь пропускную способность горловины — без дальнейшей детализации. При функциональном подходе основным параметром горловины будет число возможных параллельных передвижений. Эти передвижения нумеруются. При выполнении операции приема и отправления поезда или некоторого элементарного процесса по переработке потока снижается (занимается) некоторый набор возможных передвижений. Тем самым учитывается, хотя и укрупненно, пропускная способность горловин.

Допустим, горловина имеет шесть возможных параллельных передвижений (рис. 1).

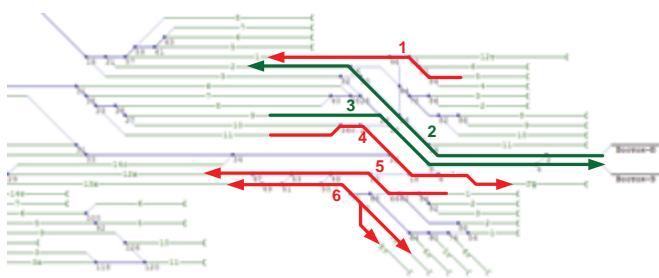


Рис. 1. Шесть параллельных передвижений в горловине станции

Передвижения нумеруются в данном случае от 1 до 6: 1 — подача локомотива из депо, 2 — прием поездов, 3 — отправление поездов, 4 — взвешивание вагонов, 5 — уборка вагонов из тепляка, 6 — маневровая работа по перестановке вагонов на повышенном пути.

Прием поезда в парк приема (передвижение 7 на рис. 2) «забирает» передвижения 1 и 2. Операции отправления (передвижение 8, см. рис. 2) и формирования подачи (передвижение 9, см. рис. 2) сократят количество одновременных передвижений до трех.

Таким образом, если сопоставить всем операциям выключаемые из доступности передвижения, можно достаточно точно отобразить в макромодели пропускную способность горловин.

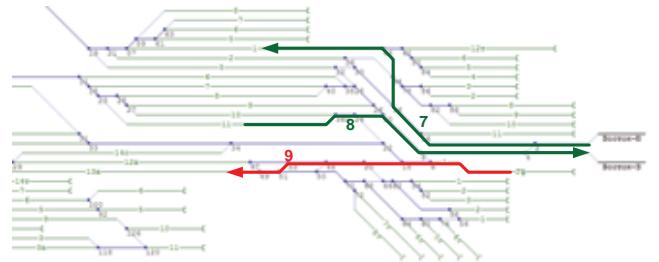


Рис. 2. Три параллельных маршрута в горловине станции

3. ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРКОВ ПУТЕЙ

При моделировании парков также используется функциональный подход. Задается не физическая, а предельная функциональная емкость парка, т.е. такая, при которой еще сохраняются его функциональные возможности. Для разных типов парков отличие функциональной емкости от физической будет различным.

Скажем, для предгорочного парка достаточно оставить один свободный путь для обгона локомотива и один — для приема очередного поезда. Естественно, надо учесть, что длина поездов чаще меньше предельной вместимости путей. А при большой загрузке сортировочного парка появится большое количество накопившихся составов, окончание формирования будет затруднено, что вызовет сложности и в процессе расформирования. Или такая ситуация: если в грузовом парке, где идет подборка вагонов на несколько грузовых фронтов, на путях будут стоять составы по 60 вагонов, то выбрать из них группы по 5–7 вагонов будет затруднительно.

Следует учитывать и другие факторы. Например, заводская сортировочная станция Новолипецк (холдинг НЛМК) формирует передачи на станции промышленного узла, и величина состава, как правило, небольшая. Естественно, обычное заполнение парка будет ниже. И оно действительно составляет около половины физической вместимости.

Далее, на ряде станций в сортировочном парке пути короткие, и накопление одного состава идет на двух, а иногда и на трех путях. То есть даже большое заполнение парка не означает, что должно возникнуть много операций окончания формирования. Отсюда предельное функциональное заполнение может быть близким к физической емкости. Например, такая ситуация наблюдается на станции Карымской Забайкальской железной дороги, где фактическое заполнение парка достигает 80 % и более.

На предельное функциональное заполнение парков влияет и пропускная способность горловин. Чем она меньше, тем ниже уровень функционального заполнения. Например, в показанной на рис. 3 горловине 11 путей соединены через одну стрелку. Если на этих путях накопится одновременно, скажем, 5 составов, то по окончании формирования возникнут огромные задержки, что можно квалифицировать как потерю парком своих функциональных свойств.

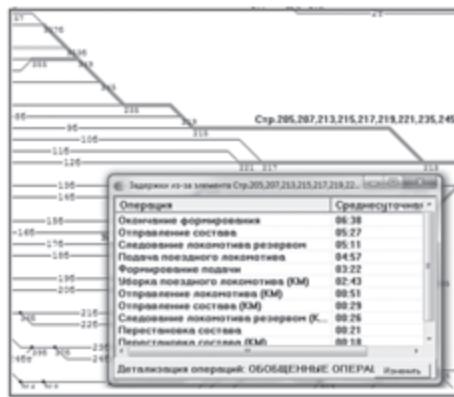


Рис. 3. Задержки в горловине с небольшим числом параллельных передвижений

Таким образом, функциональная емкость q парка всегда меньше физической емкости Q :

$$q = \alpha Q, \quad (1)$$

где α — коэффициент соотношения.

Коэффициент α зависит от назначения парка и принятой технологии, а также от пропускной способности горловины

$$\alpha = f(k_1, k_2, k_3). \quad (2)$$

При этом:

$$k_1 = \frac{m}{n}, \quad (3)$$

где m — средняя величина состава;

n — средняя вместимость путей;

$$k_2 = \frac{N_c}{N_n}, \quad (4)$$

где N_c — число направлений формирования;

N_n — число путей в парке;

k_3 — число параллельных передвижений в горловине.

4. МАКРОМДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

Технологический процесс состоит из определенной последовательности операций. Операция при макромоделировании производит перенос некоторой части потока из одной емкости в другую. При этом отображается занятость некоторого канала обработки — локомотива, горки, грузового фронта, бригады.

Парк, например, разделяется в общем случае на две части — входную и выходную. Входная — это вагоны до обработки, выходная — после обработки. Если поток многоструйный, то каждая часть может иметь несколько секторов. В выходной части будут находиться вагоны, готовые для отправления или для перехода в другой парк.

Например, предгорочный парк (рис. 4) может иметь два сектора — входной $S1$ (вагоны до обработки) и выходной $S2$ (обработанные вагоны). Операция означает перенос состава из сектора $S1$ в сектор $S2$ с занятием бригады. При этом суммарная емкость обоих секторов не должна превышать предельной функциональной емкости парка. Внешними операциями для парка будут поступление через горловину порции потока в сектор $S1$ и убытие порции потока через горку из сектора $S2$.

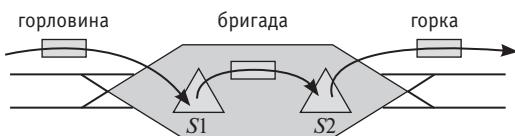


Рис. 4. Макромоделирование работы предгорочного парка

Если изменить названия операций перехода, секторов во входной и выходной части, а также каналов обработки, мож-

но описывать разнообразные процессы по аналогичным принципам макромоделирования. Так что результаты моделирования будут достаточно содержательными.

Рассмотренный принцип макромоделирования может быть использован и при отображении грузовой работы. Здесь также выделяются входная и выходная части. При этом если выгрузка осуществляется с перемещением вагонов, как, например, на вагонопрокидывателе, то эти части отображают различные структурные элементы. Если же без перемещения, то входная часть отображает при выгрузке груженые вагоны, а выходная — порожние. Здесь также могут выделяться сектора для разных типов вагонов.

Есть особенности моделирования работы сортировочного парка. Заполнение может быть разным, но от его уровня зависит частота появления готовых составов. То есть

$$M(t) = f[q(t)], \quad (5)$$

где $M(t)$ — математическое ожидание числа появившихся готовых составов после очередного роспуска;

$q(t)$ — число вагонов в сортировочном парке.

Конкретное число — это результат работы случайного датчика на основе $M(t)$. Эти закономерности необходимо получить из имитационных моделей сортировочных станций.

Сопоставление структурного подхода при микромоделировании и функционального при макромоделировании приведено в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Макромоделирование горловины

Горловина	Структурный подход	Функциональный подход
Описание объекта	Физическая структура горловины	Функциональное свойство — число параллельных передвижений
Описание процесса	Занятость стрелок при движении потока	Занятость передвижений

Таблица 2

Макромоделирование парков

Парк	Структурный подход	Функциональный подход
Описание объекта	Физическая структура с емкостью путей	Бункер с предельной функциональной емкостью
Описание процесса	Занятость путей в операции	Перенесение части потока из одного сектора в другой

Функциональный подход разработан для моделирования крупных транспортных объектов, например железнодорожных узлов. Возможность применения данного подхода может быть определена при сравнении результатов макромодели и подробной имитационной модели.

Литература

1. Козлов П. А., Владимирская И. П. Метод оптимизации структуры транспортной системы // Мир транспорта. 2009. № 2. С. 84–87. ISSN 2073-7432.
2. Мишарин А. С., Козлов П. А. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 52–54. ISSN 0048-4448.
3. Козлов П. А., Пермикин В. Ю., Колокольников В. С. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 3–5. ISSN 1815-9400.

References

1. Kozlov P. A., Vladimirskaya I. P. Metod optimizatsii struktury transportnoy sistemy [A method of optimizing the structure of the transport system] // Mir transporta. 2009. № 2. S. 84–87. ISSN 2073-7432.
2. Misharin A. S., Kozlov P. A. Imitatsionnaya ekspertiza proektov razvitiya transportnoy infrastruktury [Simulation examination of transport infrastructure development projects] // Zheleznodorozhny transport. 2014. № 4. S. 52–54. ISSN 0048-4448.
3. Kozlov P. A., Permikin V. Yu., Kolokolnikov V. S. Avtomatizirovannoe postroenie imitatsionnykh modeley krupnykh transportnykh obyektov [Computer aided construction of simulation models of major transport facilities] // Transport of the Urals. 2013. № 2 (37). S. 3–5. ISSN 1815-9400.

УДК 658.014

Владимир Петрович Шпачук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и строительной механики Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова (ХНУГХ), Александр Алексеевич Чупрынин, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и строительной механики Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова (ХНУГХ), Татьяна Александровна Супрун, аспирант кафедры теоретической и строительной механики Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова (ХНУГХ)

МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТРАМВАЯ С РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕЕЙ НА ВТОРОЙ ФАЗЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВАГОНОМ СТЫКОВОЙ НЕРОВНОСТИ

Vladimir Petrovich Shpachuk, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, Kharkov National University of Urban Economy named after A. N. Beketov (KNUUE), Alexander Alexeyevich Chuprynin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Theoretical and Structural Mechanics, Kharkov National University of Urban Economy named after A. N. Beketov (KNUUE), Tatyana Alexandrovna Suprun, graduate student, Department of Theoretical and Structural Mechanics, Kharkov National University of Urban Economy named after A. N. Beketov (KNUUE)

Mechanical interaction of tram and track in the second phase of vehicle passing through joint irregularities

Аннотация

Статья посвящена исследованию взаимодействия второй колесной пары трамвая с рельсовым путем в зоне изолированной стыковой неровности. Рассмотрен транспортный механический комплекс «вагон — рельсовый путь» в зоне стыковой неровности. Получены зависимости прогибов под первой шпалой принимающего рельса на второй фазе взаимодействия от эксплуатационных и конструктивных параметров транспортного средства и верхнего строения пути.

Ключевые слова: вагон, рельсовая колея, стыковая неровность, прогиб рельса, подвижной состав, фаза движения.

Summary

The article investigates the interaction of the second wheelset of tram with track in the area of insulated joint irregularity. A mechanical transport system «vehicle — track» is considered in joint irregularity area. The dependences of deflections under the first sleeper of receiving rail on the second phase of interaction on operating and design parameters of the vehicle and track structure have been obtained.

Keywords: car, rail track, joint irregularity, rail deflection, rolling stock, moving phase.

В современных условиях эксплуатации рельсового транспорта особое внимание уделяется совершенствованию его конструкции, а также повышению показателей надежности и эксплуатационных свойств подвижного состава. Поэтому научно-технические работы и исследования в области электрического транспорта, посвященные проблеме обеспечения надежности комплекса «вагон — рельс», т.е. механического взаимодействия в системе «вагон — рельсовая колея», относятся к числу важнейших.

При движении вагона его узлы и агрегаты подвергаются влиянию динамических сил взаимодействия между вагонами и верхним строением колеи, которые изменяются как по времени, так и по направлению и имеют ударный характер. Практика показывает, что одна из основных технических причин колебаний вагона и прогибов, связанных с ними в единую механическую систему рельсовой колеи, — неровности рельса, образующиеся вследствие переменной жесткости по длине верхнего строения пути и неравномерного накопления в нем остаточных деформаций.

Нормы срока службы рельсов, определяющие периодичность их замены, являются функцией работы рельсовой колеи под подвижным составом, типа и мощности рельса, характеристик верхнего строения пути, условий их эксплуатации. Наиболее слабая часть рельсового пути — изолированные стыковые неровности, относящиеся к рельсовым стыкам. При этом деформационные характеристики балластного слоя под опорами рельса (параметры упругой и остаточной осадки) регламентируют в конечном счете технический ресурс и продолжительность его эксплуатации. Установлено, что наибольшая осадка балластного слоя происходит в местах стыковых неровностей

под шпалами принимающего рельса — именно здесь, как правило, рельс подвергается наибольшей динамической нагрузке ударного типа.

Особенности прохождения трамвайным вагоном стыковой неровности первой колесной парой рассмотрены в работах [1, 2]. Там определены прогибы принимающего рельса под первой шпалой в условиях варьирования загрузки и скорости вагона, а также скорость режима эксплуатации транспортного средства, при которой прогибы для железобетонной шпалы ПШ-63П не превышают допустимых значений.

Но известные исследования [1–11] ограничиваются только первой фазой прохождения стыка первой колесной парой, что не соответствует реальной схеме движения вагона по стыковой неровности и, как следствие, приводит к теоретической и практической неопределенности влияния процесса прохождения вагоном зоны стыка на динамические прогибы принимающего рельса под первой шпалой.

В данной статье рассмотрен механизм прохождения вагоном стыковой неровности на второй фазе движения, когда на принимающий рельс наезжает вторая колесная пара, а первая колесная пара уже находится на нем. Схема прохождения второй колесной парой рельсового стыка изображена на рис. 1.

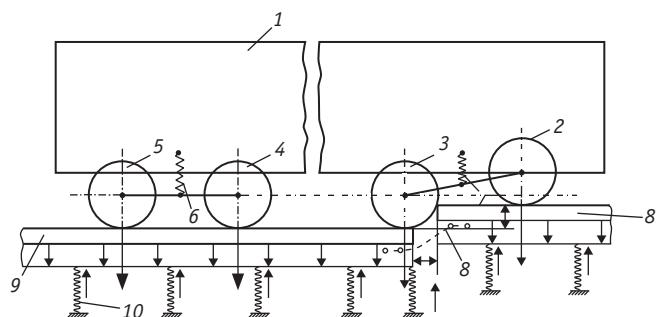


Рис. 1. Схема прохождения стыковой неровности:
 1 — вагон; 2–5 — колеса соответствующих колесных пар;
 6, 7 — центральная подвеска вагона; 8 — принимающий рельс;
 9 — отдающий рельс; 10 — упругие элементы,
 моделирующие жесткость балластного слоя под шпалами

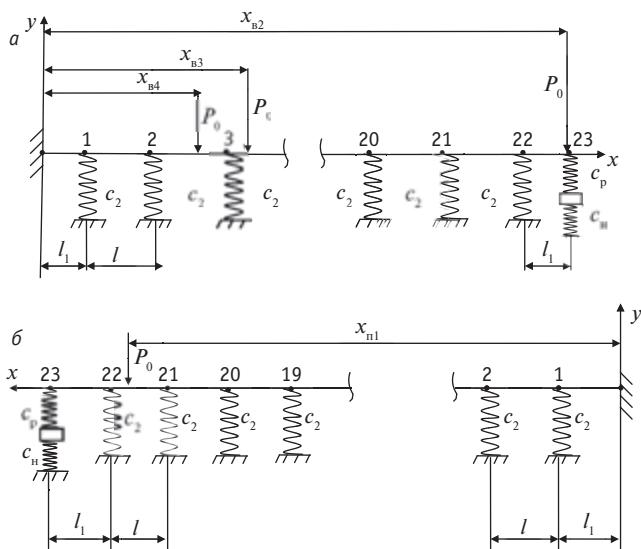
Для определения прогибов принимающего рельса под первой шпалой используется статико-динамический расчет [1]. Он включает расчет высоты h стыковой неровности в режиме статической нагрузки на отдающем и принимающем рельсе с учетом фазы движения вагона и динамический расчет прогибов принимающего рельса под первой шпалой с учетом загрузки и скорости вагона.

Механическая схема на второй фазе движения, рассматриваемая в статье, моделируется для каждого рельса, согласно результатам работ [1, 2, 8], многопролетной балкой на 23 упругих опорах.

Главными силовыми факторами, определяющими в конечном счете прогиб принимающего рельса под первой шпалой, являются постоянные по величине внешние силы P_0 , отвечающие текущему количеству колесных пар на рельсах, которые приложены (рис. 2) к отдающему x_{B_i} ($i = 2, 3, 4$ — номер колесной пары вагона) и принимающему x_{n_i} рельсам; l ,

l_1 — геометрические координаты упругих опор; c_p , c_h — жесткости рельсов на конце и стыковой накладке соответственно (определяются методом численного эксперимента — рассчитываются прогибы на конце рельса и накладке [12] от единичной силы); $P_0 = P/8$ — текущая нагрузка, приходящаяся на одно колесо колесной пары со стороны вагона; c_2 — жесткость балластного слоя под рельсом.

Считается, что при ударе колеса о ребро принимающего рельса не происходит его отрыв, а также скольжение относительно рельса. Прогибы принимающего рельса под первой шпалой вследствие его ударного и динамического взаимодействия с вагоном в месте стыка рассмотрены с учетом таких эксплуатационных и конструктивных параметров трамвая, находящегося в движении, как загрузка вагона, скорость в зоне стыка (доударная скорость), приведенная масса колеса с тележкой, скорость его центра масс, ширина стыка.



**Рис. 2. Расчетная схема отдающего (а)
 и принимающего (б) рельса на второй фазе движения**

При статическом расчете прогибов рельса (согласно [1, 2, 4, 13]) используется модель многопролетной балки на $N = 22$ упругих опорах (см. рис. 2), где $l = 0,585$ м; $l_1 = 0,45$ м; $x_{B_2} = 12,5$ м; $x_{B_3} = 7,5$ м; $x_{B_4} = 5,6$ м; $x_{n_1} = 1,9$ м. Это позволяет определить параметры опоры рельса с учетом жесткости соединения. В дальнейшем рассматривается прогиб рельса на 23 упругих опорах (22 шпалы и упор на соседний рельс через работающую накладку). В расчетах одновременно анализируются прогибы отдающего и принимающего рельса с учетом второй фазы движения вагона.

На рис. 3 показана блок-схема расчета прогибов рельса под действием статической нагрузки сил тяжести P_0 вагона. При расчете кроме механических и геометрических характеристик системы «вагон — рельсовая колея» задается совокупность сосредоточенных сил и граничных условий на конце рельса (блок 1), а также начальные параметры — геометрические — для жесткого конца рельса: прогиб и угол пово-

рота рельса в начале координат (блок 2). Далее устанавливаются начальные параметры и прогибы под первой шпалой рельса (блок 3). Прогибы под упругими опорами определяются усилия, действующие на рельс (блок 4). Для следующей (i -й) опоры полученные ранее начальные параметры и усилия на опорах считаются определенными, и по ним рассчитывается прогиб на упругой опоре y_i (блок 5) и усилия в ней P_i . Далее уточняются начальные параметры (блок 6), прогибы на опорах (блок 7) и усилия в них (блок 8). Если величина погрешности ε (блок 9) оказывается больше заданного значения, происходит следующий цикл, в котором уточняются результаты расчетов (в работе принята $\varepsilon = 0,000001$ м). Процесс расчета повторяется для следующей упругой опоры (блок 10) и далее (блок 11).

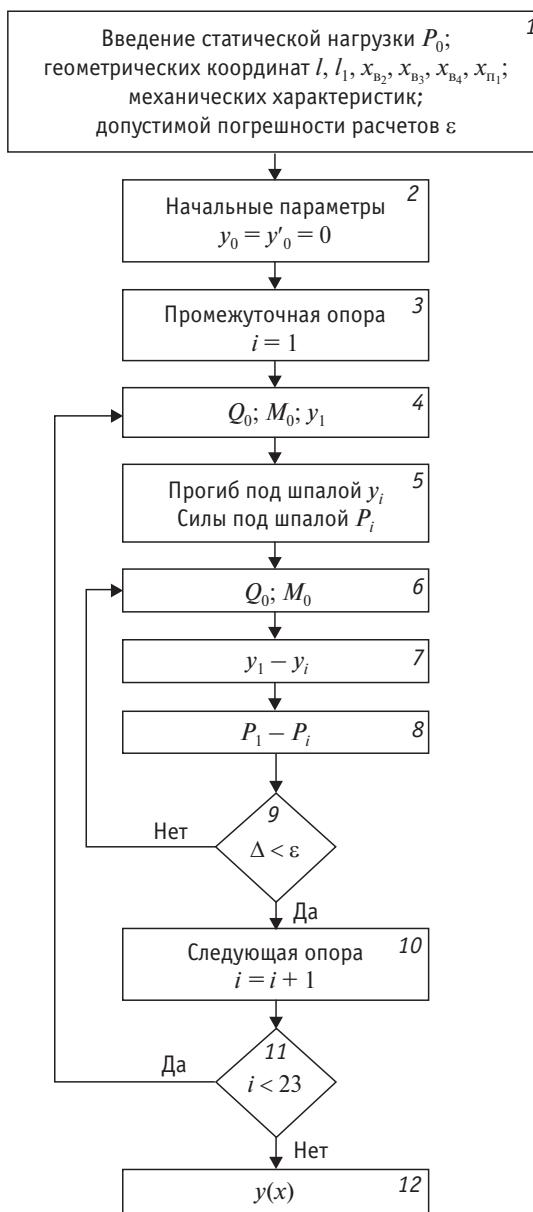


Рис. 3. Структурная схема блока расчета статических прогибов рельса

В результате после определения начальных параметров и усилий на всех опорах находится функция прогибов $y(x)$, по которой рассчитывается прогиб рельса на конце под действием заданной системы сил (блок 12).

Упругие линии отдающего и принимающего рельса приведены на рис. 4 ($y_{B_2}, y_{B_3}, y_{B_4}, y_{n_1}, y_{22}$ — прогибы рельса соответственно под колесами вагона и первой шпалой принимающего рельса).

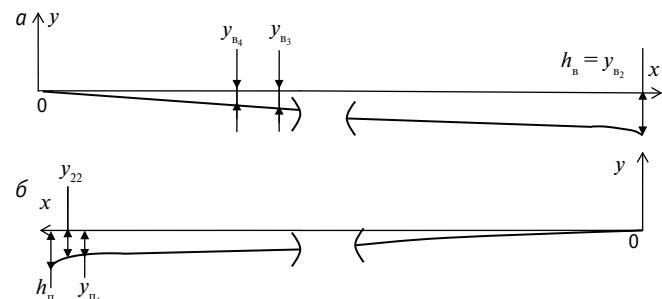


Рис. 4. Упругая линия отдающего (a)
и принимающего (b) рельса на второй фазе движения

Из определенных упругих линий отдающего и принимающего рельса на второй фазе движения, показанных на рис. 4, рассчитывается текущая величина высоты стыковой неровности:

$$h = h_n - h_b, \quad (1)$$

где h_n, h_b — прогибы принимающего и отдающего рельса на концах соответственно при $x = 12,5$ м.

Уравнения изогнутой оси рельса запишем, используя метод начальных параметров [1, 4, 14] ($y_0 = y'_0 = 0$), с учетом условий закрепления:
отдающего рельса

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \cdot \left[\sum_{i=2}^4 P_0 \frac{(x+x_{B_i})^3}{6} + Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{i=0}^N c_2 y_i \frac{(x-l_i)^3}{6} - c_{p,k} h_b \frac{(x-L)^3}{6} + q \frac{x^4}{24} \right]; \quad (2)$$

принимающего рельса

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \cdot \left[\sum_{i=1}^1 P_0 \frac{(x+x_{n_i})^3}{6} + Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{i=0}^N c_2 y_i \frac{(x-l_i)^3}{6} - c_{p,k} h_n \frac{(x-L)^3}{6} + q \frac{x^4}{24} \right], \quad (3)$$

где Q_0, M_0 — поперечная сила и изгибающий момент в начале координат;

$$c_{p,k} = \frac{c_p \cdot c_h}{c_p + c_h} \text{ — жесткость рельса на конце;}$$

L — длина рельса.

В табл. 1 приведены величины ступени h стыка, рассчитанные по формулам (2)–(3) при варьировании загрузки m_2 вагона трамвая.

Таблица 1

Величина ступени стыка на второй фазе движения вагона

m_2 , кг	4250	4588	4926	5263	5601	5939	6277	6614	6952	7290	7628
h	0,317	0,324	0,333	0,342	0,352	0,364	0,376	0,389	0,403	0,418	0,434

Полученные значения h ступени стыковой неровности позволяют с учетом скорости движения и приведенных масс вагона и колеса определить величину ударного импульса и послеударной скорости принимающего рельса V_1 при переходе колеса второй колесной пары на принимающий рельс [1, 8, 9, 15]. На фазе ударного взаимодействия колеса с торцом принимающего рельса вагон моделируется дискретной двухмассовой системой с приведенными параметрами [1].

Расчетная структурная схема принимающего рельса на второй фазе движения вагона показана на рис. 5, где m_1 — приведенная масса колеса; c_1 — жесткость подвески; P_0 — текущая нагрузка, приходящаяся на одно колесо колесной пары со стороны вагона.

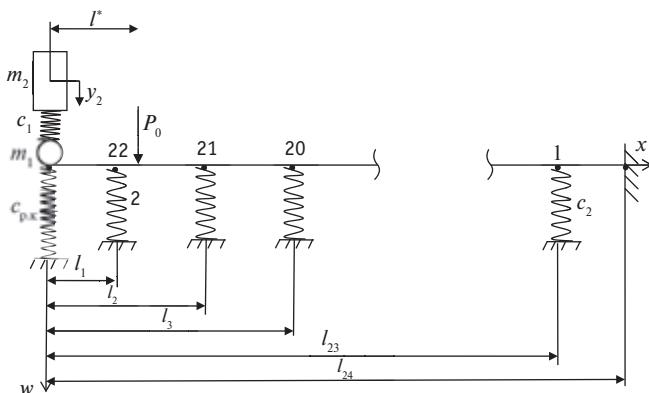


Рис. 5. Расчетная структурная схема принимающего рельса на второй фазе движения

При исследовании процессов динамического взаимодействия приняты следующие допущения, не противоречащие результатам работ [1, 3, 6, 16]:

колебания колесной пары и головки рельса происходят в безотрывном режиме (так как $m_2 \gg m_1$, допущение принято);

прогибы рельса реализуются без нарушения целостности балластного слоя (так как рассматриваются и анализируются граничные деформационные характеристики балластного слоя под первой шпалой на фазе прогибов принимающего рельса только вниз, допущение принято);

демпфирующие свойства балластного слоя не учитываются (поскольку прогиб рельса рассматривается только на первой по времени фазе его возрастания).

С учетом [1, 16] дифференциальные уравнения колебаний принимающего рельса, соответствующие механической схеме, представленной на рис. 5, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^{\text{IV}} w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^{\text{II}} w(t, x)}{\partial t^2} = \\ = \frac{c_1[y_2 - w(t, 0)]\delta(x)}{EJ} - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \\ - \frac{m_1}{EJ} \frac{\partial^{\text{II}} w(t, 0)\delta(x)}{\partial t^2} - \frac{P_0 w(t, l^*)\delta(x - l^*)}{EJ}; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_1[y_2 - w(t, 0)] = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где w — прогиб рельса;

$l^* = (12,5 - x_{n_1})$ — расстояние от края принимающего рельса до колеса первой колесной пары;

ρ, E — плотность и модуль упругости материала рельса;

J — момент инерции разреза рельса относительно нейтральной оси;

$\delta(x)$ — импульсная функция.

Система (4) решается с использованием метода Фурье. Для решения дифференциальных уравнений системы (4) применяются методы теории операционного исчисления Лапласа — Карсона [1, 5, 17]. В данном случае решение задачи свободных колебаний сводится к суперпозиции собственных форм. В результате прогиб принимающего рельса с учетом подрессоренной массы вагона и ненулевых начальных условий определяется по выражению

$$w(t, x) = \sum_{s=1}^5 z^s(x) D_s \sin \omega_s t, \quad (5)$$

где D_s — коэффициент, рассчитываемый из условий ортогональности форм колебаний [1, 8, 9, 18] с учетом доударной скорости колеса второй колесной пары и послеударной скорости рельса совместно с колесами первой и второй колесной пары;

$z^s(x), \omega_s$ — собственные формы и частота колебаний рельса.

Исследования выполнены при следующих параметрах механической дискретно-континуальной системы: $c_1 = 4,225 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$; $c_2 = 1 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$; радиус колеса $r = 0,35 \text{ м}$; скорость вагона $V = 5-15 \text{ м/с}$; $m_1 = 1100 \text{ кг}$; m_2 — от $17000/8$ (пустой вагон Т-3) до $30510/8 \text{ кг}$ [максимальная загрузка вагона при 193 пассажирах (10 чел./м^2)]. Геометрические и механические характеристики рельса типа Р-65 и двухголовых накладок, согласно ДСТУ 8193-73 [12], следующие: длина рейки $L = 12,5 \text{ м}$; $l = 0,585 \text{ м}$; $E = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $J = 3573 \text{ см}^4$; $\rho = 7,8 \text{ кг/м}^3$; $E_h = 2 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$; $J_h = 766 \text{ см}^4$; $\rho_h = 7,8 \text{ кг/м}^3$; $F_h = 57 \text{ см}^2$.

На рис. 6 и в табл. 2 приведены зависимости прогибов y_1 принимающего рельса под первой шпалой при прохождении стыковой неровности второй колесной парой в зависимости от загрузки m_2 и скорости вагона V .

Анализ полученных результатов показывает следующее.

Таблица 2

Прогиб принимающего рельса под первой шпалой на второй фазе взаимодействия, мм

V , м/с	m_2 , кг										
	4250	4588	4926	5263	5601	5939	6277	6614	6952	7290	7628
5	1,227	1,287	1,358	1,439	1,531	1,632	1,752	1,883	2,025	2,192	2,365
6	1,133	1,178	1,254	1,329	1,414	1,508	1,619	1,74	1,87	2,024	2,184
7	1,048	1,081	1,16	1,23	1,309	1,395	1,498	1,61	1,731	1,874	2,022
8	0,973	0,995	1,076	1,141	1,214	1,294	1,39	1,493	1,606	1,738	1,876
9	0,905	0,92	1,002	1,062	1,13	1,204	1,293	1,39	1,494	1,618	1,746
10	0,846	0,856	0,936	0,992	1,056	1,125	1,209	1,299	1,397	1,512	1,631
11	0,794	0,802	0,879	0,932	0,992	1,057	1,135	1,22	1,312	1,42	1,532
12	0,751	0,757	0,831	0,88	0,937	0,999	1,073	1,153	1,24	1,342	1,448
13	0,714	0,722	0,791	0,838	0,892	0,951	1,021	1,098	1,18	1,278	1,379
14	0,686	0,665	0,759	0,804	0,856	0,913	0,98	1,054	1,133	1,226	1,323
15	0,634	1,287	0,702	0,744	0,792	0,844	0,906	0,974	1,048	1,134	1,224

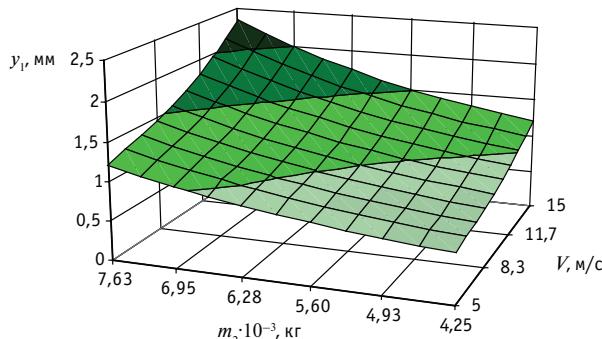


Рис. 6. Прогиб принимающего рельса на второй фазе взаимодействия

1. Изменение загрузки вагона в пределах $m_2 = 4250\text{--}7627,5$ кг, например, при скорости движения $V = 15$ м/с = const приводит к изменению прогиба принимающего рельса под первой шпалой в диапазоне $y = 1,207\text{--}2,327$ мм.

2. При повышении скорости движения вагона V от 1 до 15 м/с и загрузке в пределах $m_2 = 4250\text{--}7627,5$ кг величина прогиба изменяется в диапазоне $y = 0,624\text{--}2,327$ мм, т.е. нарастает.

Полученные характеристики осадки балластного слоя в зоне изолированной стыковой неровности используются на практике при разработке технических решений по усовершенствованию стыка пути, а также при изменении режимов эксплуатации трамвайных вагонов.

Литература

- Шпачук В. П., Далека В. Х., Коваленко А. В. Стикова динаміка трамвая. Харків : ХНАМГ, 2005. 150 с.
- Шпачук В. П., Чупринін О. О., Супрун Т. О. Динамічна взаємодія трамвая з рейковою колією при проходженні стикової нерівності колії // Комунальне господарство міст. 2012. № 105. С. 376–385.
- Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагонов. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
- Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М. : Наука, 1967. 444 с.
- Лазарян В. А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания. М. : Транспорт, 1964. 255 с.
- Коган А. Я., Пейч Ю. Л. Расчет нестационарного напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 2. С. 31–39. ISSN 0869-8163.
- Коган А. Я., Пейч Ю. Л., Полещук И. В. Расчет динамики удара в элементах конструкции пути // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири : сб. науч. тр. / ИрГУПС. Иркутск, 2003. С. 19–31.
- Шпачук В. П., Коваленко А. В. Ударное и динамическое взаимодействие трамвая с принимающим рельсом в месте изолированной стыковой неровности с учетом эксплуатационных

References

- Shpachuk V. P., Daleka V. Kh., Kovalenko A. V. Stikova dinamika tramvaya [Tram joint dynamics]. Kharkiv : KhNAMG, 2005. 150 s.
- Shpachuk V. P., Chuprinin O. O., Suprun T. O. Dinamichna vzaemodiya tramvaya z reykovoy kolieyu pri prokhodzhenni stikovoї nerivnosti kolii [Dynamic interaction between tram and rail track when passing joint irregularities] // Komunalne gospodarstvo mist. 2012. № 105. S. 376–385.
- Vershinsky S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. Dinamika vagonov [Rail car dynamics]. M. : Transport, 1991. 360 s.
- Timoshenko S. P. Kolebaniya v inzhenernom dele [Oscillations in engineering]. M. : Nauka, 1967. 444 s.
- Lazaryan V. A. Dinamika vagonov. Ustoychivost dvizheniya i kolebaniya [Rail car dynamics. Stability of motion and vibration]. M. : Transport, 1964. 255 s.
- Kogan A. Ya., Peych Yu. L. Raschet nestatsionarnogo napryazhennno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsii puti v zone styka relsov [Calculation of unsteady stress-strain state of structural elements of track structure in rail joint area] // Vestnik VNIIZhT. 2002. № 2. S. 31–39. ISSN 0869-8163.
- Kogan A. Ya., Peych Yu. L., Poleshchuk I. V. Raschet dinamiki udara v elementakh konstruktsii puti [Calculation of impact dynamics in structural elements of the track] // Problemy putevogo khozyaystva Vostochnoy Sibiri : sb. nauch. tr. / Irkutsk, 2003. S. 19–31.
- Shpachuk V. P., Kovalenko A. V. Udarnoe i dinamicheskoe vzaimodeystvie tramvaya s primiayushchim relsom v meste izolirovannoy stikovoї nerovnosti s uchetom ekspluatatsionnykh faktorov [Impact and dynamic interaction of tram with rail in insulated joint irregularity area, with account to operational factors] // Kommunalne khozyaystvo gorodov. 2005. Vyp. 60. S. 229–235.

- факторов // Коммунальное хозяйство городов. 2005. Вып. 60. С. 229–235.
9. Шпачук В.П., Коваленко А.В. Прогибы рельсового пути в месте изолированной стыковой неровности с учетом фаз доударного баллистического и послеударного безотрывного движений // Коммунальное хозяйство городов. 2005. Вып. 63. С. 216–224.
 10. Маслиев В. Г. Математическое моделирование динамических процессов в системе «экипаж — рельсовый путь» // Міжвуз. зб. наук. праць / ХарДАЗТ. Харків, 1998. Вып. 34. С. 23–26.
 11. Маслиев В. Г. Исследование динамических процессов при движении железнодорожных экипажей // Вестник Вост.-укр. гос. ун-та. Сер. Машиностроение, 1996. С. 176–178.
 12. ДСТУ 8193-73. Накладки двухголовые к рельсам типа Р65 и Р75.
 13. ДСТУ 18232-83. Рельсы контррельсовые. Технические условия.
 14. Тимошенко С. П., Гудъер Д. Ж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
 15. Пановко Я. Г., Губанова И. Г. Устойчивость и колебания упругих систем. М. : Наука, 1979. 384 с.
 16. Вериго М.Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М.Ф. Вериго. М. : Транспорт, 1986. 559 с.
 17. Бабаков И. М. Теория колебаний. М. : Наука, 1968. 691 с.
 18. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. М. : Машиностроение, 1970. 734 с.
 9. Shpachuk V. P., Kovalenko A. V. Progiby relsovogo puti v meste izolirovannoy stykovoy nerovnosti s uchetom faz doudarnogo ballisticheskogo i posleudarnogo bezotryvnogo dvizheniy [Track deflections in insulated joint irregularity area with account to phases of pre-impact ballistic and post-impact un-separated movement] // Komunalnoe khozyaystvo gorodov. 2005. Vyp. 63. S. 216–224.
 10. Masliev V. G. Matematicheskoe modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v sisteme «ekipazh — relsovyy put» [Mathematical modeling of dynamic processes in the system «vehicle — railway line»] // Mizhvuz. zb. nauk. prats / KharDAZT. Kharkiv, 1998. Vyp. 34. S. 23–26.
 11. Masliev V. G. Issledovaniye dinamicheskikh protsessov pri dvizhenii zheleznodorozhnykh ekipazhey [Research of dynamic processes in movement of railway vehicles] // Vestnik Vost.-ukr. gos. un-ta. Ser. Mashinostroenie, 1996. S. 176–178.
 12. DSTU 8193-73. Nakladki dvukhgodolovye k relsam tipa R65 i R75 [Two-headed rail splices for the rails R65 and R75].
 13. DSTU 18232-83. Relsy kontrrelsovye. Tekhnicheskie usloviya [Check rails. Specifications].
 14. Timoshenko S. P., Gudyer D. Zh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. M. : Nauka, 1975. 576 s.
 15. Panovko Ya. G., Gubanova I. G. Ustoychivost i kolebaniya uprugikh sistem [Stability and oscillations of elastic systems]. M. : Nauka, 1979. 384 s.
 16. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of track and rolling stock] / Pod red. M. F. Verigo. M. : Transport, 1986. 559 s.
 17. Babakov I. M. Teoriya kolebaniy [Theory of oscillations]. M. : Nauka, 1968. 691 s.
 18. Filippov A. P. Kolebaniya deformiruemых sistem [Oscillations of deformable systems]. M. : Mashinostroenie, 1970. 734 s.

УДК 656.078.12

Марина Викторовна Нечипорук, аспирант 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

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБАЛАНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО И МОРСКОГО ТРАНСПОРТА В МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ

**Marina Viktorovna Nechiporuk, graduate student, Department of Track and Railway Design,
 Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk,
 Vladimir Alexandrovich Anisimov, DSc in Engineering, Professor,
 Department of Track and Railway Design, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk**

Regarding the use of balanced scorecard in modeling of interaction between rail and sea transport in a multimodal transport hub

Аннотация

В качестве объекта исследования выбран мультимодальный транспортный узел (МТУ). Предметом исследования является технология взаимодействия железнодорожного и морского видов транспорта в МТУ с учетом рационального использования мощности припортовых станций и портов. Цель работы — определить условия эффективного взаимодействия объектов МТУ. Для решения поставленных задач рассмотрена сбалансированная система показателей развития мультимодального транспортного узла, выявлена главная стратегическая цель комплексного развития объектов МТУ, представлен набор показателей и определены стратегические инициативы развития и функционирования. В результате сформулировано важное условие достижения поставленной цели — обеспечение резерва пропускной способности объектов узла путем реализации организационно-технических и реконструктивных мероприятий.

Ключевые слова: мультимодальный транспортный узел, сбалансированная система показателей, единая транспортная система, стратегические цели развития мультимодального транспортного узла, провозная и пропускная способность объектов мультимодального транспортного узла.

Summary

A multimodal transport hub (MTH) is chosen as a research subject. The research is focused on the technology of interaction between rail and sea modes of transport in a MTH with account to rational use of port station and port capacities. The objective of the research is to determine the conditions for effective interaction of MTH facilities. To solve the problems a balanced scorecard of development of a multimodal transport hub is analyzed, the main strategic goal of integrated development of MTH facilities is identified, a set of indicators is presented and strategic initiatives for development and operation are identified. As a result, an important condition for achieving the goal is formulated — providing reserve capacity of hub facilities through implementation of organizational, technical and reconstruction measures.

Keywords: multimodal transport hub, balanced scorecard, single transport system, strategic goals of development of a multimodal transport hub, freight and throughput capacity of multimodal transport hub facilities.

Единая транспортная система (ЕТС) — важнейшая составляющая народнохозяйственного комплекса страны (НХК), предназначенная для удовлетворения спроса на перевозки грузов и пассажиров. Значение ее исключительно велико. Без опережающего развития ЕТС не могут быть обеспечены рост общественного производства, требования обороноспособности страны, повышение эффективности использования природных ресурсов, комплексное развитие внутренних и внешних экономических связей регионов.

ЕТС, формируя инфраструктуру народного хозяйства и обеспечивая перемещение грузов и пассажиров, является мультимодальной транспортной сетью (МТС), так как включает в себя технические системы разных видов транспорта, которые, взаимодействуя, обеспечивают удовлетворение спроса на мультимодальные перевозки НХК и населения [1].

Важную роль в работе МТС играют мультимодальные транспортные узлы (МТУ), поскольку в них осуществляется взаимодействие разных видов транспорта, существенно влияющее на эффективность мультимодальных перевозок. Основываясь на системном представлении МТУ, которое дано в [2], под термином «мультимодальный транспортный узел» будем понимать техническую систему, объединяющую в себе технологически связанные между собой объекты разных видов транспорта, обеспечивающие перевозку грузов и пассажиров. Такой узел может объединять в себе железнодорожные станции, морские и речные порты, аэропорты, вокзалы, связывающие их рельсовые пути и автомобильные дороги, конечные и промежуточные объекты магистральных трубопроводов, муниципальные транспортные сети. Также в инфраструктуру МТУ входят складские комплексы и грузовые терминалы с центрами управления и распределения

грузопотоков, объекты таможенного оформления грузов, транспортного страхования, организации, предоставляющие транспортно-экспедиторские и банковские услуги [3]. МТУ, по сути, являются пунктами технического, организационно-технологического, информационного, экономического и правового взаимодействия различных видов транспорта и субъектов, участвующих в мультимодальных перевозках.

Эффективность и надежность работы МТУ в значительной степени зависят от правильного соотношения мощностей объектов разных видов транспорта и их взаимодействия [4]. В связи с этим развитие мультимодальных транспортных узлов, безусловно, должно быть комплексным.

Однако при переходе от плановой экономики к рыночной из-за несогласованности интересов собственников объектов транспортной инфраструктуры разные виды транспорта в МТУ развивались диссонансно, что привело к диспропорциям в соотношении мощностей объектов некоторых МТУ.

К таким мультимодальным транспортным узлам относятся МТУ Дальнего Востока России.

Регион имеет прямой выход к морю. Такое его территориальное положение благоприятствует развитию международных торговых связей России со странами АТР, что обеспечивает рост транзитных перевозок в железнодорожно-морском сообщении через МТУ Дальнего Востока.

Таким образом, вновь приобретает особую актуальность проблема комплексного развития объектов железнодорожного и морского видов транспорта и их эффективного взаимодействия в МТУ, но теперь уже в условиях рыночной экономики.

Используя обобщенное системное представление МТУ, приведенное в [2], рассмотрим узел без автомобильного транспорта, показав модель МТУ как совокупность объектов железнодорожного и морского транспорта (рис. 1).

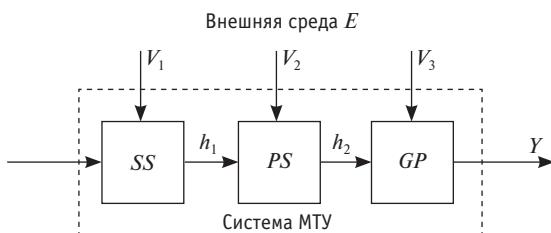


Рис. 1. Объектная модель МТУ

В модели выделим три основных объекта — сортировочную станцию (*SS*), припортовую станцию (*PS*) и грузовой порт (*GP*), которые связаны железнодорожными подходами h_1 и h_2 . Эта модель МТУ отражает в общем виде процессы функционирования и взаимодействия объектов системы, которые управляются соответствующими структурами.

На станции такой структурой является административно-хозяйственный аппарат, включающий в себя начальника станции (ДС), его заместителей (ДСЗ) и руководителей смен (ДСЦ, ДСЧ, ДСП). Особая роль в оперативном управлении движением поездов и маневровой работой на станции отводится дежурному по станции (ДСП) — сменному помощнику начальника станции, который единолично распоряжается приемом, отправле-

нием и пропуском поездов, а также прочими передвижениями и взаимодействием с другими видами транспорта.

В порту аппарат управления включает в себя начальника порта и его заместителей. Оперативное руководство работой порта осуществляют заместитель начальника порта по эксплуатации, в подчинении которого находится главный диспетчер, отвечающий за организацию работы порта и взаимодействие его со смежными видами транспорта.

В настоящее время для повышения эффективности взаимодействия в МТУ разных видов транспорта создают логистические центры, представляющие собой транспортно-распределительные комплексы, основными функциями которых являются:

- организация и выполнение погрузочно-разгрузочных работ;
- краткосрочное и длительное хранение;
- грузопереработка;
- выполнение необходимых таможенных процедур;
- экспедирование и переадресовка грузов;

— предоставление полного комплекса сервисных и коммерчески-деловых услуг — производственно-техническое, банковское, информационное, консалтингово-аналитическое обслуживание и другие виды логистического сервиса.

Деятельность структур, управляющих функционированием и взаимодействием объектов МТУ, а также их развитием, направлена на достижение конкретных результатов — целей, для измерения которых используются показатели, характеризующие объем и качество выполняемой системой работы. К ним относятся технико-эксплуатационные и экономические показатели: пропускная, провозная и перерабатывающая способность объектов узла, время нахождения грузов и пассажиров в МТУ, время нахождения подвижного состава (вагонов, локомотивов, судов и т.д.) в МТУ, производительность локомотивов, задержки доставки грузов и пассажиров из-за отказов в работе объектов МТУ, сохранность грузов, капитальные затраты на развитие объектов и эксплуатационные расходы на осуществление перевозок и содержание основных устройств.

Для описания целей функционирования и развития МТУ используем сбалансированную систему показателей (ССП) [5], которые характеризуют объемы и надежность работы основных объектов системы, а также эффективность и качество мультимодальных перевозок.

Основным элементом ССП является карта стратегических задач (табл. 1). В ней приводятся определения стратегических целей, измеряющие их показатели, их декомпозиция по перспективам — основным направлениям функционирования и развития транспортной отрасли страны, целевые значения показателей, причинно-следственные связи между целями и показателями.

В методологии ССП определены следующие перспективы: финансы, внешняя среда (для транспортной отрасли — это отправители и получатели грузов, пассажиры), внутренние процессы (развитие транспортных объектов, перевозочный процесс, поддержание основных фондов в работоспособном состоянии), обучение персонала.

Причинно-следственные связи между стратегическими целями и показателями для наглядности представлены в виде дерева целей, на вершине которого указана главная цель комплексного развития объектов МТУ (рис. 2).

Таблица 1

Карта стратегических задач функционирования и комплексного развития МТУ

Перспективы	Стратегические цели	Показатели	Целевые значения показателей	Стратегические инициативы
Финансы	Удовлетворение спроса на перевозки и увеличение их объема	– Объем потребных перевозок – народнохозяйственная эффективность – отраслевая эффективность – провозная, пропускная и перерабатывающая способность объектов узла – коэффициент готовности объектов МТУ к освоению потребного объема перевозок		
Внешняя среда	Повышение качества жизни населения Развитие производительных сил региона			Комплексный план мероприятий по развитию объектов МТУ и оптимизации эксплуатационного процесса по критериям эффективности, надежности и качества
Внутренние процессы	Развитие МТУ для обеспечения роста потребного объема перевозок Оптимизация эксплуатационного процесса в МТУ по критериям эффективности и качества мультимодальных перевозок Повышение надежности работы объектов МТУ	– Время нахождения грузов и пассажиров в МТУ – время нахождения подвижного состава (вагонов, локомотивов, судов) в МТУ – производительность локомотивов – количество претензий по сохранности грузов – суммарное время задержки доставки грузов и пассажиров из-за отказов в работе объектов МТУ	Отраслевые задания по улучшению технико-эксплуатационных и экономических показателей работы всего МТУ	
Обучение персонала	Повышение квалификации работников МТУ			Программа повышения квалификации работников МТУ

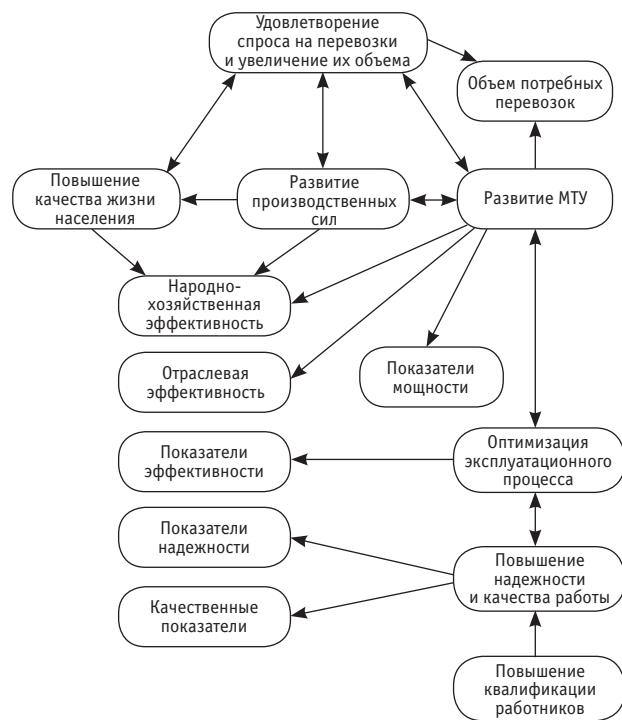


Рис. 2. Причинно-следственные связи между стратегическими целями и показателями комплексного развития МТУ

Учитывая значительное влияние развития МТУ на социально-экономические параметры внешней среды (развитие производительных сил региона, эффективность работы предприятий, освоение природных ресурсов, уровень безработицы и т.п.),

рассмотрим определение главной цели развития МТУ с точки зрения социально-экономического развития регионов страны и с позиции развития транспортной отрасли.

Главной стратегической целью является удовлетворение спроса предприятий и населения страны на транспортные услуги региона и увеличение объемов перевозок грузов и пассажиров для повышения доходов всего транспортного комплекса, поскольку полное и качественное обеспечение спроса клиентов транспортных услуг на перевозки способствует привлечению новых объемов грузов и пассажиров.

Оценка развития МТУ для обеспечения роста объемов потребных перевозок производится посредством отраслевой эффективности и показателей мощности — провозной, пропускной и перерабатывающей способности. Чтобы увеличить мощность объектов МТУ, необходимо проводить мероприятия (стратегические инициативы), направленные на повышение провозной способности.

Выбор стратегических инициатив производится на основе сравнительной оценки проектных альтернатив комплексного развития МТУ. Для их оценки с позиции надежности в сбалансированную систему показателей включен коэффициент готовности объектов МТУ к освоению потребного объема перевозок. Этот показатель позволяет определить готовность объектов МТУ к выполнению заданного объема работы на расчетный период с учетом надежности их функционирования.

Показатели технической эффективности (время нахождения подвижного состава в МТУ, производительность локомотивов), надежности (задержки доставки грузов и пассажиров из-за отказов в работе объектов МТУ) и качества (время нахождения грузов и пассажиров в МТУ, количество претензий по сохранности грузов) используются для оценки достижения

стратегических целей в перспективе «внутренние процессы» и позволяют учесть причинно-следственные связи между развитием МТУ, оптимизацией эксплуатационного процесса, повышением надежности работы ее объектов (рис. 3).

На рис. 3 приведен основной компонент карты сбалансированных показателей, отражающий причинно-следственные связи между показателями функционирования и развития МТУ и важнейшим параметром перевозочного процесса — временем выполнения операций с поездами. От изменения этого параметра зависят показатели мощности объектов МТУ, эффективности, качества и надежности их функционирования.

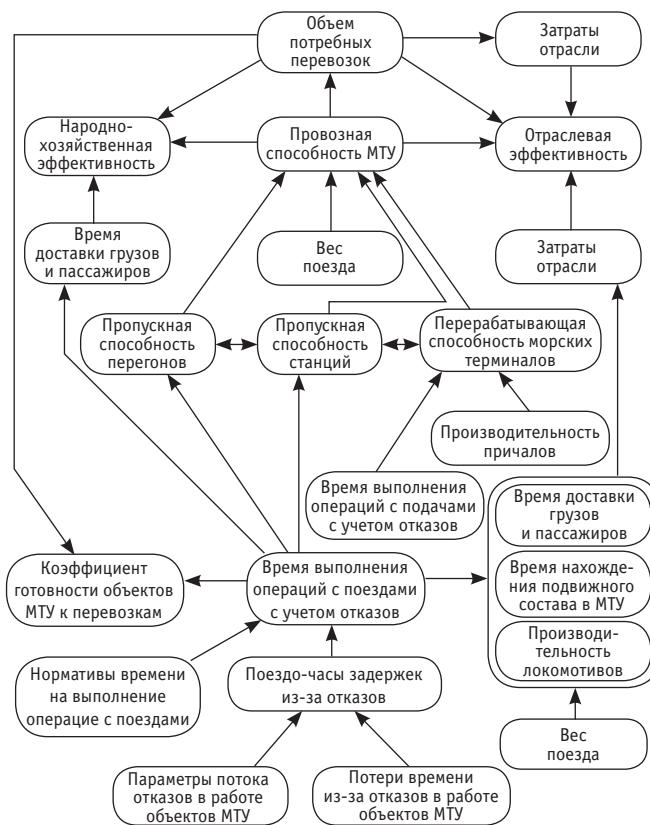


Рис. 3. Причинно-следственные связи между показателями функционирования и развития МТУ

Карта стратегических задач и карта сбалансированных показателей используются для построения исходного множества возможных проектных альтернатив развития МТУ и оптимизации эксплуатационного процесса по критериям эффективности и качества мультимодальных перевозок.

При этом одним из основных условий эффективного взаимодействия объектов МТУ (см. рис. 2) является следующее соотношение их мощностей, приведенное в [2],

$$\Gamma_{\text{B}}^{(SS)} > \Gamma_{\text{B}}^{(h_1)} > \Gamma_{\text{B}}^{(PS)} > \Gamma_{\text{B}}^{(GP)}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{в}}^{(ss)}$ — возможная пропускная способность сортировочной станции;

$\Gamma_{\text{в}}^{(h_i)}$ — возможная пропускная способность участка (подхода);

$\Gamma_{\text{в}}^{(PS)}$ — возможная пропускная способность припортовой станции;

$\Gamma_{\text{в}}^{(GP)}$ — суммарная пропускная способность грузового порта.

Выполнение условия (1) позволит предотвратить заполнение пропускной способности железнодорожных подходов к узлу выше критического уровня и обеспечить их бесперебойную работу в случае отказов в работе МТУ и задержек судов по прибытию в порт.

При разработке графика движения поездов пропускная способность железнодорожных участков и станций рассчитывается с учетом резервов времени на обслуживание технических устройств, устранение их отказов и регулировочные мероприятия при отклонении размеров движения поездов от среднесуточных. В расчете пропускной способности морского порта также закладываются соответствующие резервы, учитывающие влияние на его работу технических отказов устройств и метеорологических факторов.

Вероятностный характер отказов в работе объектов МТУ, являющихся следствием воздействия различных стохастических факторов, вносит некоторую долю неопределенности в оценку мощности МТУ и примыкающих к нему звеньев железнодорожного (МТЖЗ) и морского (МТМЗ) транспорта.

В исследованиях, посвященных надежности функционирования разных видов транспорта, в той или иной мере фактор неопределенности учитывается посредством использования различных прогнозных моделей и методик, которые могут быть применены только в рамках одного вида транспорта.

В мультимодальных перевозках виды транспорта тесно взаимодействуют друг с другом в МТУ. Поэтому возникновение отказа или непредвиденной ситуации одного элемента МТС (МТУ, МТЖЗ или МТМЗ), несомненно, оказывает влияние на другие ее элементы. Например, задержка поезда на МТЖЗ или судна на МТМЗ повлечет за собой простои в работе объектов МТУ даже при их исправном техническом состоянии. Отказы технических устройств припортовой или сортировочной станций МТУ, погрузочно-разгрузочных устройств морского порта могут вызвать задержки и грузовых поездов, и морских судов. Таким образом, при расчетах мощности элементов МТС и показателей эффективности их функционирования необходимо учитывать фактор влияния отказов одних видов транспорта на показатели работы других.

При определении наличной и возможной провозной способности следует экономически обосновать необходимые резервы мощности, которые позволят сгладить негативные влияния отказов элементов МТС при взаимодействии разных видов транспорта в МТУ.

Под резервами мощности будем понимать превышение наличной или возможной провозной способности над потребной, они могут быть достигнуты путем реализации организационно-технологических и реконструктивных мероприятий.

К организационно-технологическим относятся мероприятия, направленные на использование резервов наличной пропускной способности без изменения технических параметров постоянных устройств и потому не требующие значительных расходов



на реализацию. Суть этих мероприятий заключается в совершенствовании методов организации движения поездов и улучшении использования технических средств и подвижного состава для сокращения времени выполнения операций с грузом. На железнодорожном транспорте к ним относятся повышение скорости движения поездов, уменьшение станционных интервалов, переход на другие типы графика движения, ускорение обработки поездов и сокращение времени их стоянки на путях станций и порта в ожидании погрузки или отгрузки, а также применение подталкивания и двойной тяги, пропуск сдвоенных составов (с локомотивами в голове) для повышения массы поезда.

Реконструктивные мероприятия связаны с изменением технических параметров постоянных устройств и применением новой техники, что требует значительных капитальных затрат. К реконструктивным мероприятиям относятся электрификация железных дорог, введение более мощных локомотивов, оборудование линий автоблокировкой, электрической централизацией стрелок и сигналов, диспетчерской централизацией, введение в действие автоматизированных систем управления взаимодействием между портом и дорогой, строительство вторых путей, двухпутных вставок, увеличение длины и числа станционных путей и путей на территории порта, расширение терминально-складских площадей порта, увеличение числа погрузочно-разгрузочных машин и др.

Однако создание резервов провозной способности путем реконструктивных мероприятий может быть ограничено из-за нехватки припортовой территории, из-за больших капитальных затрат на реконструкцию или строительство.

Проблема этапного развития и увеличения мощности (проводной и пропускной способности) объектов МТУ рассматривалась многими учеными. Научные труды, связанные с проблемой транспортной сети, можно разделить на две группы: рабо-

ты, в которых проблема решалась в условиях планового ведения народного хозяйства (И. Т. Козлов, Г. Н. Ковшов, С. Б. Козлова, В. И. Арсенов, Ю. А. Григорян, Е. С. Свинцов, В. Н. Лившиц, И. Б. Сотников, В. Н. Паршиков и др.), и работы, рассматривающие ее решение в условиях рыночной экономики (С. М. Гончарук, В. С. Шварцфельд, Н. С. Нестерова, Ю. А. Быков, Е. С. Свинцов, А. П. Батурина и др.).

Все они внесли значительный вклад в теорию и практику развития транспортных систем. Однако в предлагаемых моделях транспортных сетей и полигонов основное внимание уделяется развитию направлений, звеньев и участков сети. Узлы рассматриваются как транспортные объекты, функционально связывающие звенья сети и обеспечивающие их пропускную способность. Такой подход не позволяет отразить взаимодействие звеньев и объектов узлов, так как пропускная способность этих объектов находится в зависимости не только от параметров технических устройств и технологии работы, но и от загрузки примыкающих участков смежных видов транспорта и надежности их функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования являются основой для разработки методики моделирования взаимодействия железнодорожного и морского транспорта с целью повышения эффективности мультиmodalных перевозок, которая оценивается с помощью сбалансированной системы показателей (ССП) [5]. При этом одним из основных условий достижения поставленной цели функционирования и развития МТУ является обеспечение резерва провозной способности объектов узла, который может быть достигнут путем реализации организационно-технологических и реконструктивных мероприятий в рамках экономически обоснованной стратегической инициативы.

Литература

1. Транспортная стратегия России на период до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/f0d/trans_strat_08_12_2004.pdf (дата обращения: 12.05.2014).
2. Методологические основы проектирования этапного развития облика и мощности мультиmodalной транспортной сети : монография / С. М. Гончарук, Вл. А. Анисимов, Н. С. Нестерова и др. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. 227 с.
3. Основы взаимодействия железных дорог с другими видами транспорта / В. В. Повороженко, Н. К. Сологуб, Е. Д. Хануков и др. М. : Транспорт, 1972. 304 с.
4. Методологические основы теории проектирования изменения мощности региональной сети железных дорог : монография / В. С. Шварцфельд, В. А. Анисимов, Вл. А. Анисимов и др. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. 362 с.
5. Нечипорук М. В., Анисимов Вл. А. Сбалансированная система показателей функционирования и развития мультиmodalного транспортного узла // Сб. тр. X юбилейн. междунар. науч.-практ. студ. и молод. учен. Trans-Mech-Art-Chem. М. : Изд-во МИИТ, 2014.

References

1. Transportnaya strategiya Rossii na period do 2020 goda [Transport Strategy of Russia for the period up to 2020]. [Electronic resource]. URL: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/f0d/trans_strat_08_12_2004.pdf (date accessed: 12.05.2014).
2. Metodologicheskie osnovy proektirovaniya etapnogo razvitiya oblika i moshchnosti multimodalnoy transportnoy seti : monografiya [Methodological bases of designing of a staged development of appearance and capacity of a multimodal transport network : monograph] / S. M. Goncharuk, Vl. A. Anisimov, N. S. Nesterova i dr. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2012. 227 s.
3. Osnovy vzaimodeystviya zheleznykh dorog s drugimi vidami transporta [Fundamentals of interaction of railways with other modes of transport] / V. V. Povorozhenko, N. K. Sologub, Ye. D. Khanukov i dr. M. : Transport, 1972. 304 s.
4. Metodologicheskie osnovy teorii proektirovaniya izmeneniya moshchnosti regionalnoy seti zheleznykh dorog : monografiya [Methodological bases of the theory of design of changes in regional rail network capacity : monograph] / V. S. Shwartsfeld, V. A. Anisimov, Vl. A. Anisimov i dr. Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2005. 362 s.
5. Nechiporuk M. V., Anisimov Vl. A. Sbalansirovannaya sistema pokazateley funktsionirovaniya i razvitiya multimodalnogo transportnogo uzla [Balanced scorecard of operation and development of multimodal transport hub] // Sb. tr. X yubileyn. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. stud. i molod. uchen. Trans-Mech-Art-Chem. M. : Izd-vo MIIT, 2014.

УДК 656.2 (09)

Алексей Александрович Конов, кандидат исторических наук, доцент кафедры «Философия и история» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА УРАЛЕ В 1956–1970 ГГ.

Alexey Alexandrovich Konov, PhD in History, Associate Professor, Department of Philosophy and History, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Implementation of Railway Transport Electrification Master Plan in the Urals in 1956–1970

Аннотация

В статье рассмотрены особенности реализации Генерального плана электрификации железнодорожного транспорта на Урале. Электрификация представлена как комплексный процесс инновационных изменений в материально-технической и кадровой базе. Увеличение пропускной способности железных дорог, рост скоростей движения, повышение производительности и улучшение культуры труда стали первыми итогами реализации Генерального плана электрификации на Урале. Еще более важным результатом стало создание новых учебных заведений по подготовке высококвалифицированных специалистов в области электрификации транспорта. В статье сделан вывод о том, что железные дороги Урала были электрифицированы как составные части транзитных магистралей между западными и восточными районами СССР: Москва — Байкал, Москва — Свердловск, Южно-Сибирская магистраль. Особенностями перевода на электрическую тягу железных дорог Урала стали суровые природно-климатические условия, горный рельеф местности, организация и проведение строительных работ в условиях самой высокой на сети грузонапряженности, а также необходимость массовой переподготовки работников в короткие сроки.

Ключевые слова: железная дорога, Генеральный план электрификации железных дорог, подготовка кадров, инженерно-технические работники, Урал, модернизация.

Summary

The article describes the specifics of implementation of Railway Transport Electrification Master Plan in the Urals. Electrification is represented as a complex innovative process bringing changes in physical infrastructure and personnel. Increase of railways capacity, growth of speeds, increase of productivity and improvement of work culture were the first outcomes of implementation of Electrification Master Plan in the Urals. Even more important result was the creation of new institutions training highly qualified experts in the field of transport electrification. The article concludes that the Urals railways were electrified as components of transit routes between western and eastern regions of the USSR: Moscow — Baikal, Moscow — Sverdlovsk, South-Siberian Railway. The specifics of changeover of Urals railways to electric traction were harsh climatic conditions, mountainous terrain, organization and carrying out of construction work amidst the highest traffic volume in the network, as well as the need for massive retraining of workers in the short term.

Keywords: railway, Railway Transport Electrification Master Plan, training, engineering and technical personnel, the Urals, modernization.

Железнодорожный транспорт России вступил в XXI в. с целым комплексом нерешенных проблем. Прежде всего, это проблема соответствия уровня технического и технологического развития отрасли задачам растущей экономики. Основными требованиями эффективного транспортного обслуживания сегодня являются скорость, своевременность, ритмичность и безопасность перевозок грузов и пассажиров. Существующая на железнодорожном транспорте России производственная база еще не в полной мере удовлетворяет этим требованиям.

Проблемы современного железнодорожного транспорта возникли не сегодня. Впервые попытка всестороннего обновления материально-технической базы и ликвидации отставания отечественного транспорта от транспорта развитых западных стран была предпринята в СССР в 1955 г. Тогда в основу научно-технического прогресса была положена электрификация, которая осмысливалась советским руководством как комплексная программа модернизации всей транспортной системы на новой технологической основе. В связи с этим приобретает огромный интерес изучение советского варианта модернизации, его итогов и нерешенных проблем.

4–12 июля 1955 г. в Москве состоялся Пленум ЦК КПСС, результатом работы которого стало постановление «О задачах по дальнейшему подъему промышленности, техническому прогрессу и улучшению организации производства». Пленум провозгласил важнейшей задачей партийных, советских и хозяйственных организаций в области промышленности всемерное повышение технического уровня производства. Основным условием решения этой задачи становилось резкое повышение темпов технического совершенствования во всех отраслях промышленности на базе электрификации, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, внедрения новейших машин и аппаратов [1, с. 513]. К февралю 1956 г. объективно сложились все предпосылки для массовой электрификации железных дорог СССР.

Во-первых, это быстрый рост пригородных перевозок, вызванный развитием промышленности и увеличением населения индустриальных районов Среднего и Южного Урала. Пригород-

ное движение становилось таким же необходимым, как и городской транспорт. Паровая тяга требовала больших капитальных вложений в подвижной состав и путевые устройства и не могла дать хорошего технико-экономического решения массовых пассажирских перевозок.

Во-вторых, перевод на электротягу был вызван необходимостью повышения пропускной и провозной способности железных дорог, обусловленного быстрым ростом экономики, ускоренным возрождением оборонного потенциала СССР и расширением связей с другими государствами. На рубеже 1950–1960-х гг. интенсивное укрепление транспортных связей между промышленными районами страны, преуменьшительное развитие тяжелой индустрии, увеличение продукции сельского хозяйства и товаров народного потребления, повсеместное промышленное и жилищное строительство определили непрерывный рост перевозок грузов на всех железных дорогах Советского Союза. Наиболее быстро перевозки росли на магистралях, которые связывали Сибирь и Дальний Восток с Уралом, Урал и Поволжье с Центром, Донбасс и Кавказ с центральными и северо-западными районами. Особенно выделялось направление Кузбасс — Урал, где были сосредоточены самые мощные грузовые потоки железных дорог. Электрическая тяга давала возможность осуществлять с высокими скоростями и низкой себестоимостью массовое перемещение грузов, получать наиболее значительный прирост провозной способности и тем самым экономить огромные капиталовложения на строительстве вторых и третьих путей, а также разгружающих линий.

В-третьих, к началу массовой электрификации железных дорог СССР сложилась мощная научно-исследовательская база в области электрической тяги и электроснабжения транспорта. С 1918 г. этими вопросами занимался Научно-экспериментальный институт путей сообщения, с 1930-го — Институт транспортной электротехники, с 1931-го — Научно-исследовательский институт электрификации и с 1942-го — отделение электрификации Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). Большую роль в решении научных проблем электрической тяги сыграло созданное электрифицированное экспериментальное кольцо ВНИИЖТ с опытной подстанцией, позволявшее питать контактную сеть напряжением 25 кВ переменного, а также 3 кВ постоянного тока.

14–25 февраля 1956 г. в Москве состоялся XX съезд КПСС, который провозгласил непрерывный технический прогресс решающим условием дальнейшего роста всего промышленного производства. Министр путей сообщения Б. П. Бещев в своем докладе сообщал: «Будут электрифицированы основные магистрали, связывающие центр страны с Уралом, Сибирью и Донбассом» [2, с. 281–284].

В феврале 1956 г. Совет Министров СССР принял Генеральный план электрификации железных дорог, предусматривающий в период 1956–1970 гг. электрифицировать 40 тыс. км линий, т.е. увеличить протяженность электрифицированных железных дорог в 9 раз. Намечалось перевести на электрическую тягу в первую очередь важнейшие грузонапряженные линии, горные линии с тяжелым профилем пути и с большими размерами пассажирского движения и пригородные участки в 59 крупнейших промышленных центрах.

Железнодорожный транспорт Урала вступил в новый этап своего развития. Если в начале 1930-х и в первые послевоенные годы с помощью электрической тяги решались в основном локальные проблемы, то со второй половины 1950-х гг. вступила в силу общесоюзная программа электрификации, имевшая цель повышение эффективности всей транспортной системы страны.

Важнейшей задачей Генерального плана была электрификация главной железнодорожной магистрали (протяжением 9260 км), которая связывала центральные районы с Уралом, Сибирью и Дальним Востоком: Москва — Рязань — Куйбышев — Челябинск — Новосибирск — Иркутск — Владивосток. Предусматривался также перевод на электрическую тягу направлений Москва — Харьков — Ростов — Минеральные Воды, Москва — Казань — Свердловск — Курган, Москва — Горький — Киров — Пермь — Свердловск — Вагай — Омск, Караганда — Акмолинск — Магнитогорск — Абдулино, Москва — Елец — Дебальцево, Москва — Ленинград, Воркута — Котлас — Конюша — Вологда — Ленинград. Таким образом, электрификация железных дорог Урала и Сибири составляла практически основную часть Генерального плана [3, с. 21–24].

Согласно Генеральному плану электрификации, до перевода железных дорог на электротягу необходимо было выполнить работы по постановке пути на щебеночное основание, укладке тяжелых рельсов, удлинению путей на станциях, а также по оборудованию линий автоблокировкой и диспетчерской централизацией. Всего в 1956–1970 гг. предстояло обеспечить укладку щебеночного основания на 40 тыс. км электрифицированных линий, оборудовать автоблокировкой линии протяжением 19 тыс. км, установить диспетчерскую централизацию на 9 тыс. км. Предусмотренные Генеральным планом мероприятия по реконструкции верхнего строения пути и введению автоблокировки позволяли значительно повысить скорости движения поездов, их вес, а главное, сделать движение безостановочным на длинных тяговых плечах [4, с. 24]. Без проведения этих мероприятий эффект электрификации снижался.

На реализацию Генерального плана электрификации железных дорог СССР требовалось свыше 30 млрд руб. капиталовложений и дополнительные расходы цветных металлов. Поэтому руководство страны и специалисты министерства путей сообщения искали способы и средства сокращения затрат. Одним из вариантов решения проблемы стал ввод новой системы тока — однофазного промышленной частоты.

Переменный ток обеспечивал резкое снижение затрат цветных металлов на контактную сеть, уменьшение в 2–3 раза числа тяговых подстанций, которые сами по себе намного упрощались и сокращали расходы на свое техническое обслуживание. Легче становилась контактная подвеска: экономия меди составляла более 2 т/км. Полностью снималась проблема износа контактных проводов и их периодической замены, исключалась электрокоррозия опор контактной сети и подземных сооружений. Все это приводило к снижению эксплуатационных затрат и в конечном счете к снижению себестоимости перевозок. В начале 1960-х гг. министр путей сообщения Б. П. Бещев принял решение о повсеместном внедрении системы переменного тока. На постоянном токе осуществлялась электрификация

лишь тех участков, которые были продолжением линий, ранее электрифицированных по этой системе.

Для реализации Генерального плана потребовалось создание на Урале хорошо подготовленной кадровой базы опытных инженеров и техников, квалифицированных рабочих, способных в короткие сроки освоить и применить новые технологии.

Одними из первых штат работников службы энергоснабжения и электрификации пополнили выпускники Свердловского электромеханического техникума. Они трудились на монтаже и эксплуатации контактной сети и тяговых подстанций, строили и реконструировали здания локомотивных депо, работали помощниками машиниста и машинистами электровозов и электропоездов. В 1956 г. был основан Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта (УрЭМИИТ), который возглавил выпускник МЭМИИта (1933 г.) доцент И. В. Уткин, и открыт прием студентов на специальность «Электрификация железнодорожного транспорта». В 1958 г. начал функционировать электромеханический факультет, а в 1959-м организованы профилирующие кафедры — «Электрическая тяга» (заведующий А. М. Дядьков) и «Энергоснабжение электрических железных дорог» (заведующий В. А. Кабанов) [4]. На первом этапе своего развития институт имел всего две специальности — «Электрификация железнодорожного транспорта» и «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Количество обучаемых росло именно в годы интенсивной электрификации (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что самая напряженная работа по подготовке инженеров и техников пришлась как раз на период реализации Генерального плана (1956–1970 гг.). Некоторое снижение количества обучавшихся в вузах начиная с 1970 г. обусловлено, во-первых, отчислением по неуспеваемости и, во-вторых, значительным снижением темпов электрификации железных дорог.

В связи с реализацией Генерального плана электрификации железнодорожного транспорта на Урале возникла необходимость резко увеличить долю инженерно-технического труда (табл. 2).

Разрыв между потребностью и наличием на Свердловской железной дороге (СвЖД) инженерно-технических кадров замедлял темпы электрификации, а нехватка специалистов заставляла переводить самых опытных из них с одного участка на другой. Статистика показывает, что доля труда техников постепенно сближалась с долей инженерного труда, а с 1970 г. уже существенно ее превышала. То есть можно говорить о том, что на СвЖД достаточно отчетливо проявился дефицит инженерных кадров.

Реализация Генерального плана потребовала создания новой производственной базы для электрификации и снабжения электрифицируемых участков строительными материалами, железобетонными конструкциями заводского изготовления и электротехническим оборудованием.

В 1959 г. завод Уралэлектроаппарат начал выпускать ртутные выпрямители мощностью 9900 кВт с последовательной схемой соединения вентилем. В результате на тяговых подстанциях железных дорог стала возможной модернизация выпрямительных агрегатов, предусматривающая переключение их вентилем на последовательную схему соединения. С введением в 1967 г. на подстанциях постоянного тока полупроводниковых преобразователей заводом были разработаны и выпускались тяговые трансформаторы для ртутных и полупроводниковых преобразователей. Уже в 1972 г. полупроводниковые выпрямительные агрегаты полностью вытеснили ртутные не только на новых, но и на всех эксплуатируемых подстанциях постоянного тока.

Кроме того, Уралэлектроаппарат освоил серийное производство быстродействующих выключателей постоянного тока ВАБ-43 на напряжение 3,3 кВ с нагрузочной способностью 4000 А и выключателей с нагрузочной способностью 6300 А. Необходимость в них была вызвана ростом нагрузок на фидерах тяговых подстанций и увеличением мощности преобразовательных агрегатов. Выключатели ВАБ-43 были способны отключать токи короткого замыкания до 27 кА. В начале 1970-х гг. завод стал выпускать выключатель ВАБ-49 с повышенным током отключения [6, с. 231].

Таблица 1

**Обучение работников Свердловской железной дороги
в вузах и техникумах железнодорожного транспорта в 1960–1976 гг., чел. [5]**

Год	1960	1961	1962	1965	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Число обучавшихся в вузах	748	855	1124	1581	1605	1493	1313	1236	1148	1189	1211
Число обучавшихся в техникумах	754	869	1381	2258	2555	2375	2381	2305	2432	2433	2437

Таблица 2

**Обеспеченность Свердловской железной дороги работниками
с высшим и средним специальным образованием в 1958–1976 гг., % [5]**

Год	1958	1960	1964	1965	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Специалисты с высшим образованием	66,6	68	55,5	58,2	62,2	64,8	67,2	71,7	69,9	74,4	74,3
Специалисты со средним специальным образованием	64,7	62,2	46,6	46,4	75,3	79,5	81,4	85,2	82,1	86,0	88,1
Инженеры	—	—	—	—	58,4	63,5	65,5	69,4	69,7	70,6	71,5
Техники	—	—	—	—	68,1	72,8	77,3	80,9	82,1	82,9	85,2

Для массовой электрификации железных дорог потребовалось производство опор контактной сети. Во время Великой Отечественной войны и в первые послевоенные годы на Урале устанавливали деревянные опоры, а с 1948 г. стали применять металлические — и на станциях, и на перегонах. После 1956 г. в связи с увеличением объема электрификации для сокращения расхода металла было принято решение перейти на железобетонные опоры. Вначале их выпускали с арматурой периодического профиля, а затем — с предварительно напряженной арматурой, с арматурой из высокопрочной стальной проволоки. Конструктивно опоры выполнялись двутавровыми и коническими.

В 1956 г. были разработаны «Технологические правила сооружения опор контактной сети». В них было нормативно закреплено основное техническое направление на индустриализацию сооружения фундаментов и опор контактной сети с их предварительным изготовлением на заводах, в отличие от применявшегося ранее бетонирования фундаментов на месте с помощью бетоносмесительных поездов.

Первые центрифуги для изготовления центрифугированных железобетонных опор контактной сети были смонтированы в 1956 г. на Оверятском заводе железобетонных конструкций. В 1957 г. на Погринском заводе железобетонных конструкций при участии ВНИИЖТ была отработана технология изготовления предварительно напряженных центрифугированных опор. После проведения испытаний было начато массовое производство опор этого типа. В 1958 г. на предприятиях министерства транспортного строительства работали 14 трехроликовых центрифуг, в том числе в Оверятах, Исети (Свердловская железная дорога) и Мелеузе (Уфимская железная дорога), а также ряд полигонов и стендов для изготовления двутавровых опор новой, улучшенной конструкции [7, с. 131].

Электрифицированные линии с интенсивным движением поездов и высокими скоростями потребовали совершенных средств автоматики и телемеханики, которые в значительной мере предопределяли надежность электроснабжения, возможность применения новых методов эксплуатации, рост производительности труда. В 1950–1953 гг. в отделении электрификации ВНИИЖТ была создана аппаратура автоматики, которая гарантировала непрерывный контроль вакуума и температуры ртутных выпрямителей, и аппаратура автоматики повторного включения фидеров контактной сети. Внедрение этих устройств, выполнивших сравнительно ограниченные функции, позволило упростить эксплуатацию тяговых подстанций. Затем появились устройства автоматического включения резерва (АВР) — вначале для трансформаторов собственных нужд, а потом для всех имеющих «резерв» аппаратов, включая выпрямители.

Благодаря использованию систем автоматики и телемеханики резко возросла оперативность управления, появилась возможность вести работы в малые «окна», что привело к существенному повышению производительности труда бригад контактной сети. Кроме того, сократилось время, необходимое на устранение неисправностей, за счет быстрого поиска мест повреждений и более быстрого переключения разъединителей.

Реализация Генерального плана на Урале началась с электрификации в 1956–1957 гг. двухпутного участка Транссибирской

магистрали Курган — Макушино протяжением 131 км. Он имел исключительно большой грузопоток, особенно во время уборки хлеба и предшествующий ей период. Работы были выполнены всего за девять месяцев. Одновременно со сдачей в эксплуатацию электрифицированного участка была закончена реконструкция пути, связей и сигнализации, централизации и блокировки. Таким образом, в 1950-е гг. четко обозначились характерные черты электрификации железных дорог Урала: перевод на электрическую тягу важнейших транзитных линий с большой грузонапряженностью; комплексный характер строительных работ, когда наряду с электрификацией осуществлялась реконструкция материальной базы других служб; форсированный характер строительных работ (часто без перерыва движения поездов); параллельное и одновременное с электрификацией формирование кадровой базы.

Следует особо отметить, что на железных дорогах Урала при подготовке кадров огромную роль играл личный опыт работников, первыми освоивших новую технику. Теоретические знания и практические навыки передавались в ходе межличностного общения во время занятий в локомотивных депо, школах передового опыта и технических школах дорог.

В 1958–1959 гг. был электрифицирован однопутный участок со сложным горным профилем Свердловск — Дружинино по проекту Уралгипротранса. В 1961 г. были завершены работы по электрификации южноуральского участка Транссиба Челябинск — Курган — Макушино (389 км). Таким образом, был полностью электрифицирован главный ход Транссиба от Москвы до Байкала протяженностью 5400 км. Магистраль проходила по важнейшим экономическим районам страны. Составляя всего лишь 4,3 % длины сети, она связывала крупнейшие промышленные предприятия Восточной и Западной Сибири, Урала и Поволжья не только друг с другом, но и с Москвой. Переход на электрическую тягу железнодорожной магистрали от Москвы до Байкала позволил накопить большой опыт электрификации грузонапряженного направления огромной протяженности [8, с. 47–48].

К концу 1963 г. была завершена электрификация линии Балезино — Пермь — Шаля — Свердловск общей протяженностью 620 км. Паровозы полностью ушли с главного хода Свердловской железной дороги. В 1964 г. электрифицированные линии Свердловской магистрали стали составной частью электрифицированного широтного направления железнодорожной сети Москва — Владимир — Горький — Киров — Пермь — Свердловск протяженностью 1750 км. В 1966–1970 гг. были введены в эксплуатацию электрифицированные направления большой протяженности на Южном Урале: Челябинск — Картали — Орск (534 км) и первый участок на переменном токе Магнитогорск — Тобол — Железорудная (348 км) с двумя станциями стыкования в Карталах и Магнитогорске [8, с. 178–179].

Настоящим событием конца 1960-х гг. стала электрификация 250-километровой линии Смычка — Алапаевск — Егоршино — Богданович, в результате значительно возросла пропускная способность важного грузового направления в обход Свердловского узла. Затем была проложена контактная сеть над рядом крупных участков восточного и юго-восточного направлений, уже освоенных тепловозами: Свердловск — Каменск-Уральский

(118 км, 1972 г.), Путевка — Богданович (91 км, 1976 г.), Богданович — Тюмень (225 км, 1980 г.).

Окончание в 1985 г. работ по электрификации главного хода Свердловской дороги Чепца — Пермь — Шаля — Свердловск — Богданович — Тюмень — Называевская позволило существенно ускорить продвижение поездов на Западно-Сибирскую дорогу. Это было крайне важно для развития производительных сил Севера Тюменской области в связи со строительством железной дороги Тобольск — Сургут — Нижневартовск, Сургут — Уренгой [9, с. 103–119].

К 1991 г. на Южно-Уральской железной дороге образовались три электрифицированных транзитных направления. Первое — участок главного хода Транссибирской магистрали от станции Кропачево до станции Исиль-Куль протяженностью 980 км, который проходил через Златоуст, Челябинск, Курган, Петропавловск. Второе — «южный ход» дороги от станции Челябинск до станции Кинель, соединявший Карталы, Орск, Оренбург, Бузулук (протяженность 1237 км). Третье — участок от станции Тобол Казахской железной дороги до станции Инзер Куйбышевской железной дороги протяженностью 467 км. Самый большой на сети удельный вес электрической тяги на Южно-Уральской дороге и более высокие темпы ее электрификации объяснялись тем, что значительные участки этой дороги были составными частями двух важнейших магистралей СССР — Транссибирской и Южно-Сибирской. Поэтому модернизация Южно-Уральской дороги проводилась достаточно интенсивно, чтобы не сдерживать грузопотоки, шедшие с крупнейших в стране широтных магистралей.

В электрификации железных дорог на Урале в 1945–1991 гг. можно выделить два основных этапа.

На первом (1945–1955 гг.) был осуществлен переход от электрификации отдельных наиболее загруженных участков к переводу на электрическую тягу важных направлений большой протяженности с равнинным профилем. На этом этапе началась электрификация отдельных участков Транссибирской магистрали, а также линий, которые усиливали связь центральных районов страны с Сибирью, а Кузнецкого и Карагандинского угольных бассейнов — с промышленными районами Урала.

На втором этапе (1956–1991 гг.) осуществлялась реализация Генерального плана электрификации, продолжена электрификация восточных линий, прилегавших к Западно-Сибирской железной дороге. Электрическая тяга вводилась в действие на основных грузонапряженных направлениях большой протяженности, связывающих европейскую часть страны с Уралом и Сибирью, в том числе с ее восточными районами.

Генеральный план электрификации железных дорог СССР был завершен с большим опозданием — к 1982 г. На Урале работы по электрификации и введению тепловозной тяги были выполнены полностью и в назначенный срок. В 1970 г. Свердловская железная дорога отказалась от паровозов и одна из первых на сети перешла на электро- и тепловозную тягу. Использование тепловозов на некоторых отделениях дороги было временным — при переводе тяги от паровозов к электровозам [10, с. 128]. Это означает, что Генеральный план электрификации получил реальное воплощение прежде всего на железных

дорогах Урала и Сибири, превратив их в составные части крупнейших электрифицированных магистралей страны: Москва — Свердловск, Москва — Байкал, Южно-Сибирская магистраль.

Обратимся к анализу причин невыполнения Генерального плана электрификации железных дорог СССР. Важнейшая из них связана с тем, что не удалось своевременно реконструировать путевое хозяйство, осуществить автоблокировку и электрическую централизацию стрелок на электрифицируемых линиях. Все эти работы включались в проекты электрификации линий и значительно удорожали их, хотя должны были предшествовать электрификации. В результате в условиях ограниченных материально-технических ресурсов и капитальных вложений в развитие транспорта Госплан СССР с 1962 г. начал устанавливать годовые задания по электрификации ниже предусмотренных Генеральным планом.

Серьезное отставание было допущено в вопросах производства электроподвижного состава, электрооборудования и специальных изделий для электрификации железных дорог. Совершенно не соответствовала заявленным в Генеральном плане темпам электрификации дорог организация производства электровозов только на двух заводах — Новочеркасском и Тбилисском. Электрооборудование для моторвагонных секций выпускалось только на одном Рижском заводе. В результате Генеральный план выполнялся в условиях явно недостаточной производственной базы.

Электрификация железнодорожного транспорта на Урале имела ряд существенных особенностей.

1. Темпы роста электрификации транспорта на Урале в силу большой грузонапряженности дорог были выше, чем по стране. Если по СССР удельный вес электрифицированных железнодорожных путей в 1960 г. составил 10,9 %, в 1965-м — 18,9, в 1970-м — 25 %, то в Свердловской области — соответственно 19,9, 29,6 и 36,3 %.

2. Электрификация железных дорог Урала осуществлялась комплексно: удлинялись станционные пути, развивались узлы, устройства связи и СЦБ, проводилась реконструкция локомотивного хозяйства.

3. Строительно-монтажные работы носили форсированный характер: необходимо было в предельно короткие сроки без ущерба для основных перевозочных процессов модернизировать оборудование и внедрять новые виды тяги не на отдельных участках, а на целых направлениях дорог. Отсюда стремление уральских железнодорожников максимально индустриализировать и механизировать все работы, резко разграничить их по отдельным этапам.

4. Железные дороги Урала в силу особенностей своего географического расположения и природно-климатических условий стали своеобразным испытательным полигоном для нового электротехнического оборудования и локомотивной техники. Суровый климат и горный профиль местности Урала позволяли проверить многие технические решения в области электрификации, а главное, доказать преимущества электрической тяги в регионах с экстремальными природными условиями.

Анализ документов и статистических материалов позволяет сделать ряд важных выводов по итогам электрификации железных дорог Урала.

1. Железные дороги Урала были электрифицированы по Генеральному плану прежде всего как составные части транзитных магистралей между восточными и западными районами СССР, имевшие самую высокую грузонапряженность на сети. Этим объясняются такие темпы электрификации, а также наибольшие на сети доля в грузообороте электрической тяги и доля электрифицированных линий в общей протяженности железных дорог.

2. Генеральный план электрификации не был реализован в назначенный срок и в полном объеме. Электрификация потребовала глубокой модернизации материальной базы всех служб транспорта, оснащения автоблокировкой и диспетчерской централизацией больших по протяженности направлений дорог, что наряду с расходами на строительные работы стало

непосильным бременем для советского государства. Возникшие во второй половине 1960-х — в 1970-е гг. дорогостоящие транспортные магистрали в Западной Сибири и на Дальнем Востоке отвлекли на себя основные материально-финансовые и кадровые ресурсы, необходимые для реализации Генерального плана. Приоритет был отдан новому направлению развития.

3. Электрификация способствовала интенсивному проникновению на Урал научно-технических инноваций, повысила долю интеллектуального инженерного труда на железных дорогах, ускорила развитие автоматизированных систем управления перевозками. А главное достижение — на Урале возникли новые центры подготовки кадров высшей квалификации, ставшие вместе с тем и центрами передовой транспортной науки.

Выражаю глубокую признательность и благодарность профессору, доктору исторических наук М. Т. Крючкову за оказанную поддержку при подготовке статьи.

Литература

- Коммунистическая партия Советского Союза в резолюциях и решениях съездов, конференций и Пленумов ЦК (1898–1986). Т. 8. 1946–1955. М. : Политиздат, 1985. 542 с.
- XX съезд КПСС. 14–25 февраля 1956 г. Стенографический отчет. М. : Госполитиздат, 1956. 636 с.
- Железнодорожный транспорт СССР. 1956–1970 гг. : сб. документов / Гл. ред. Н. Е. Аксененко; отв. сост. Т. В. Сорокина. М. : Эгра, 1998. 552 с.
- Крючков М. Т., Конов А. А. Кадровое обеспечение интенсивной модернизации Свердловской железной дороги // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 3–9. ISSN 1815-9400.
- Государственный архив Свердловской области. Ф. Р-65. Оп. 13. Д. 219. Д. 289. Д. 327. Д. 348.
- Электрифицированные железные дороги России (1929–2004 гг.) / Под общ. ред. П. М. Шилкина. М. : Интекст, 2004. 336 с.
- 50 лет электрификации железных дорог СССР / Под ред. С. М. Сердинова. М. : Транспорт, 1976. 239 с.
- История железнодорожного транспорта Советского Союза. Т. 3. 1945–1991 гг. М. : Академкнига, 2004. 631 с.
- Крючков М. Т. Анализ модернизации железнодорожного транспорта на Урале в 1956–1991 гг. // Вестник УрГУПС. 2012. № 3 (15). С. 103–119. ISSN 2079-0392.
- Владимиров В. А., Вязгин Д. В., Жданов М. П. Электрификация Свердловской ордена Ленина, ордена Октябрьской революции железной дороги (1933–1983 гг.) / Под ред. В. С. Наговицына. Екатеринбург : Урал Юр Издат, 2012. 136 с.

References

- Kommunisticheskaya partiya Sovetskogo Soyuza v rezolyutsiyakh i resheniyakh syezdov, konferentsiy i Plenumov TsK (1898–1986) [Communist Party of the Soviet Union in Resolutions and Decisions of Congresses, Conferences and Plenums of the Central Committee (1898–1986)]. Т. 8. 1946–1955. М. : Politizdat, 1985. 542 s.
- XX syezd KPSS. 14–25 fevralya 1956 g. Stenograficheskiy otchet [XX Congress of the CPSU. 14–25 February 1956. Verbatim Report]. М. : Gospolitizdat, 1956. 636 s.
- Zheleznodorozhny transport SSSR. 1956–1970 gg. : sb. dokumentov [USSR railway transport. 1956–1970 : collection of documents] / Gl. red. N. Ye. Aksenenko; otv. sost. T. V. Sorokina. M. : Egra, 1998. 552 s.
- Kryuchkov M. T., Konov A. A. Kadrovoe obespechenie intensivnoy modernizatsii Sverdlovskoy zheleznoy dorogi [Staffing support for intensive modernization of the Sverdlovsk Railway] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). S. 3–9. ISSN 1815-9400.
- Gosudarstvenny arkhiv Sverdlovskoy oblasti [State Archives of the Sverdlovsk region]. F. R-65. Op. 13. D. 219. D. 289. D. 327. D. 348.
- Elektrifitsirovannye zheleznye dorogi Rossii (1929–2004 gg.) [Electrified railways of Russia (1929–2004)] / Pod obsch. red. P. M. Shilkina. M. : Intekst, 2004. 336 s.
- 50 let elektrifikatsii zheleznykh dorog SSSR [50th anniversary of electrification of railways in the USSR] / Pod red. S. M. Serdinova. M. : Transport, 1976. 239 s.
- Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Sovetskogo Soyuza. Т. 3. 1945–1991 gg. [History of rail transport of the Soviet Union. Vol. 3. 1945–1991]. М. : Akademkniga, 2004. 631 s.
- Kryuchkov M. T. Analiz modernizatsii zheleznodorozhnogo transporta na Urale v 1956–1991 gg. [Analysis of the modernization of rail transport in the Urals in 1956–1991] // Herald of USRT. 2012. № 3 (15). S. 103–119. ISSN 2079-0392.
- Vladimirov V. A., Vyazigin D. V., Zhdanov M. P. Elektrifikatsiya Sverdlovskoy ordena Lenina, ordena Oktyabrskoy revolutsii zheleznoy dorogi (1933–1983 gg.) [Electrification of Sverdlovsk Order of Lenin, Order of the October Revolution Railway (1933–1983)] / Pod red. V. S. Nagovitsyna. Ekaterinburg : Ural Yur Izdat, 2012. 136 s.

УДК 656.212.2.073.22

Хабибулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Сергей Анатольевич Ситников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Андрей Александрович Гордиенко, аспирант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗА И ВАГОНА С ГРУЗОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА

Khabibulla Turanovich Turanov, DSc in Engineering, Professor, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Sergey Anatolyevich Sitnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Andrey Alexandrovich Gordienko, graduate student, Department of Stations, Junctions and Freight Work, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Mathematical description of stability of cargo and carload in the presence of transverse slippage

Аннотация

В статье на основе классических положений механики выведены аналитические формулы устойчивости (опрокидывания) груза или вагона с грузом относительно одной из опор с учетом поперечного сдвига груза для случаев, когда гибкие элементы креплений одного направления находятся в рабочем состоянии, а упорные элементы другого направления отсутствуют либо полностью разрушены.

Ключевые слова: вагон, груз (гусеничная техника), гибкие элементы крепления, сдвиг груза поперек вагона, устойчивость груза и вагона с грузом.

Summary

The paper, relying on the classical mechanics statements, derives analytical formulas of stability (rollover) of cargo or a loaded car with respect to one of the supports with account to transverse slippage of cargo for the cases when the flexible fasteners of one side are operable and thrust elements of the other side are either absent or completely destroyed.

Keywords: rail car, cargo (tracked vehicles), flexible fasteners, cargo slippage across the car, stability of load and loaded car.

В работе [1] приведены результаты расчета потери устойчивости груза и вагона с грузом относительно опор *A* и *B*, выполненные по методике ТУ [2] для случая, когда полностью разрушены гибкие элементы ($R_{iy} = R_{iz} = 0$) одного и упорные элементы ($R_{бр,y} = 0$) другого направления. Кроме того, отмечено, что устойчивость груза и вагона с грузом в этих условиях не обеспечена ($\eta < 1,0$), тем самым использование методики ТУ [2] для оценки безопасности перевозочного процесса вызывает возражения. В [1] также сделан вывод о необходимости разработки новой методики расчета устойчивости груза и вагона с грузом относительно одной из опор.

Заметим, что до настоящего времени отсутствуют аналитические формулы, по которым можно выполнить конкретный пример инженерного расчета устойчивости груза или вагона с грузом с учетом поперечного сдвига груза ($\Delta y \geq 0$) при наличии гибких элементов креплений. При этом ясно, что в случае $\Delta y > 0$ упорные элементы крепления исключаются из расчета.

Таким образом, выведение аналитических формул, позволяющих разработать методику инженерного расчета устойчивости груза или вагона с грузом, является актуальной для транспортной науки технической задачей.

1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

На основе классических положений механики вывести аналитические формулы устойчивости (опрокидывания) груза или вагона с грузом относительно одной из опор с учетом поперечного сдвига груза при наличии гибких элементов креплений одного направления.

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для примера рассмотрим устойчивость перевозимой на вагоне гусеничной техники (в дальнейшем — груз) силой тяжести $G = 419$ кН (например, гидравлического экскаватора HITACHI EX-400) с упорными и гибкими элементами крепления (рис. 1).

На рис. 1 используются следующие обозначения: G и $l_{\text{тр}}$ — соответственно сила тяжести груза и кратчайшее расстояние от проекции центра масс груза на горизонтальную плоскость до ребра опрокидывания A поперек вагона; I_{ey} и I_{ez} — поперечная и вертикальная переносные силы инерции, условно приложенные к центру масс груза [1, 3]; $h_{\text{нр}}$ — высота центра масс груза от пола вагона; F_{rw} — сила аэродинамического сопротивления (ветровая нагрузка) [1, 4]; h_{rwz} — высота точки приложения силы аэродинамического сопротивления до пола вагона; $G_0 = G + G_t$ — суммарная сила тяжести груза и порожнего вагона (тары вагона); S — половина расстояния между кругами катания колесных пар [3]; h_z — высота пола вагона от УГР; h_{rw} — высота точки приложения силы аэродинамического сопротивления от УГР; R_{iy} и R_{iz} — проекции усилий в гибких элементах крепления на поперечную и вертикальную оси; h_i — расстояние от пола вагона до грузовых проушин (петель) груза [5, 6]; A и B — опоры (точки) контактов груза с левой боковой стороной вагона и гребней колес колесной пары с наружной рельсовой нитью.

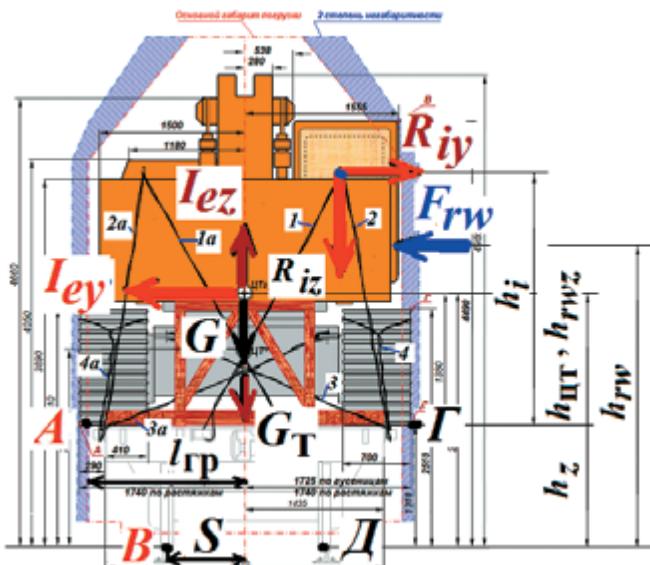


Рис. 1. Вид (с торца) вагона с грузом:

- 1–4, 1a–4a — номера гибких элементов;
- А, В, Г, Д — возможные опоры (точки)
- опрокидывания груза или вагона с грузом

Особо отметим, что на рис. 1 направление вертикальной переносной силы инерции I_{ez} , которая условно приложена к центру масс груза, соответствует неблагоприятной ситуации [3], поскольку в этом случае I_{ez} способствует опрокидыванию груза и вагона с грузом.

3. УСЛОВИЯ ЗАДАНИЯ

Условия задания такие же, как и в [5, 6], т.е. рассматривается движение подвижного состава на прямом участке пути, поскольку на нем величина поперечного переносного ускорения больше, чем на кривом участке [7, 8]. Физико-геометрические параметры крепления груза перечислены ниже.

1. Параметры гибких элементов крепления (задаваемые и принимаемые величины) схемы погрузки.

1.1. Физические и геометрические параметры гибких элементов крепления (как и в [6, 9, 10]): $E = 1 \cdot 10^7$ — модуль упругости гибких элементов крепления с учетом скрутки проволоки, kH/m^2 [4]; $d = 6$ — диаметр проволоки упругого элемента крепления, мм; $n = 8$ — количество нитей проволоки гибкого элемента крепления, шт.; $R0 = 20$ — принятое среднее значение усилия предварительных скруток проволоки крепления, кН (обычно в пределах 15–25 кН, поскольку при перевозке грузов на вагоне все гибкие элементы крепления обязательно подвергаются предварительной скрутке) [9, 10].

1.2. Вычисленные по данным рис. 1 значения проекции гибких элементов крепления на продольную ось вагона, м [5, 6]:

одного направления

$$\begin{aligned} a1 &= 2,074; a2 = 1,009; a3 = 2,074; a4 = 1,63; a5 = 1,542; \\ a6 &= 1,719; a7 = 0,122; a8 = 0,3; a1a = 2,074; a2a = 1,009; \\ a3a &= 2,074; a4a = 1,63; a5a = 1,542; a6a = 1,719; a7a = 0,122; \\ a8a &= 0,3; \end{aligned}$$

другого направления

$$\begin{aligned} a1p &= 0,3; a2p = 1,453; a3p = 4,291; a4p = 2,163; \\ a5p &= 0,655; a6p = 1,364; a7p = 1,542; a8p = 0; a1ap = 0,3; \\ a2ap &= 1,453; a3ap = 4,291; a4ap = 2,163; a5ap = 0,655; \\ a6ap &= 1,364; a7ap = 1,542; a8ap = 0. \end{aligned}$$

1.3. Вычисленные по данным рис. 1 значения проекции гибких элементов крепления на поперечную ось вагона, м [6, 9, 10]:

одного направления

$$\begin{aligned} b1 &= 1,131; b2 = 0,783; b3 = 2,262; b4 = 0,174; b5 = 0,174; \\ b6 &= 0,174; b7 = 0,957; b8 = 1,218; b1p = 0,174; b2p = 0,957; \\ b3p &= 1,305; b4p = 2,088; b5p = 0,174; b6p = 0,174; b7p = 0,174; \\ b8p &= 0; \end{aligned}$$

другого направления

$$\begin{aligned} b1a &= 1,131; b2a = 0,783; b3a = 2,262; b4a = 0,174; \\ b5a &= 0,174; b6a = 0,174; b7a = 0,957; b8a = 1,218; \\ b1ap &= 0,174; b2ap = 0,957; b3ap = 1,305; b4ap = 2,088; \\ b5ap &= 0,174; b6ap = 0,174; b7ap = 0,174; b8ap = 0. \end{aligned}$$

1.4. Вычисленные значения проекции гибких элементов крепления на вертикальную ось, м:

одного направления

$$\begin{aligned} h1 &= 2,337; h2 = 2,337; h3 = 0,748; h4 = 0,655; h5 = 0,655; \\ h6 &= 0,655; h7 = 2,057; h8 = 1,122; h1p = 1,122; h2p = 2,057; \\ h3p &= 1,309; h4p = 0,655; h5p = 0,655; h6p = 0,655; h7p = 0,655; \\ h8p &= 0; \end{aligned}$$

другого направления

$$\begin{aligned} h1a &= 2,337; h2a = 2,337; h3a = 0,748; h4a = 0,655; \\ h5a &= 0,655; h6a = 0,655; h7a = 2,057; h8a = 1,122; \\ h1ap &= 1,122; h2ap = 2,057; h3ap = 1,309; h4ap = 0,655; \\ h5ap &= 0,655; h6ap = 0,655; h7ap = 0,655; h8ap = 0. \end{aligned}$$

1.5. Длина упругих элементов крепления, м:

$$l_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + h_1^2}, l_1 = 3,323;$$

$$l_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + h_2^2}, l_2 = 2,664 \text{ и т.д.}$$

Вычисленные значения длин упругих элементов крепления, м: одного направления

$$\begin{aligned} l_1 &= 3,323; l_2 = 2,664; l_3 = 3,159; l_4 = 1,765; l_5 = 1,684; \\ l_6 &= 1,847; l_7 = 2,272; l_8 = 1,683; l_{1p} = 1,174; l_{2p} = 2,694; \\ l_{3p} &= 4,672; l_{4p} = 3,076; l_{5p} = 0,942; l_{6p} = 1,523; l_{7p} = 1,684; l_{8p} = 0; \\ &\text{другого направления} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{1a} &= 3,323; l_{2a} = 2,664; l_{3a} = 3,159; l_{4a} = 1,765; l_{5a} = 1,684; \\ l_{6a} &= 1,847; l_{7a} = 2,272; l_{8a} = 1,683; l_{1ap} = 1,174; l_{2ap} = 2,694; \\ l_{3ap} &= 4,672; l_{4ap} = 3,076; l_{5ap} = 0,942; l_{6ap} = 1,523; l_{7ap} = 1,684; l_{8ap} = 0. \end{aligned}$$

4. ФОРМУЛЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗА И ВАГОНА С ГРУЗОМ ОТНОСИТЕЛЬНО ОДНОЙ ИЗ ОПОР

Покажем аналитический вывод формул, по которым выполняют проверку устойчивости груза (или вагона с грузом) при воздействии поперечных и вертикальных сил, используя понятия удерживающего и опрокидывающего моментов классической механики, широко применяемые в технике [1, 3, 4]. Исследуем реальные случаи перевозки грузов, когда от воздействия поперечных сил (I_{ey} и F_{rw}) естественным является сдвиг груза поперек вагона ($\Delta y \neq 0$), при этом гибкие элементы креплений одного направления остаются сохранными, а упорные элементы другого направления, прибитые вплотную к боковой стороне груза, полностью разрушены (т.е. реакция упорных брусков $R_{by,y} = 0$). Соответственно здесь будут учтены проекции усилий предварительных скруток проволоки крепления (R_{iy}) и гибких элементов креплений (R_i) одного направления на поперечную и вертикальную оси, т.е. $R_{iy} \neq 0$, $R_{iz} \neq 0$ и $R_{iy} \neq 0$, $R_{iz} \neq 0$ (см. рис. 1).

В данном случае удерживающие и опрокидывающие моменты поперечных и вертикальных сил относительно опор *A* и *B* при сдвиге груза поперек вагона ($\Delta y \neq 0$) и в случае, когда его общий центр масс расположен со смещением поперек вагона (b_{cm}), математически будут представлены следующим образом [1, 4].

Для груза:

$$\begin{aligned} M_{y,y}^A &= G[(l_{tp} \pm b_{cm}) - \Delta y] + \sum_{i=1}^{n_{kp}} (R_{0i} + R_i) \frac{h_i}{l_i} [(l_{tp} \pm b_{cm}) + \\ &+ B_B - (\Delta y + b_i)] + \sum_{i=1}^{n_{kp}} (R_{0i} + R_i) \frac{b_i}{l_i} h_i; \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_{op.y}^A = I_{ey} h_{tt} + I_{ez} (l_{tp} \pm b_{cm}) + F_{rw} h_{rwz}. \quad (2)$$

Для вагона с грузом:

$$\begin{aligned} M_{y,y}^B &= G_0[(S \pm b_{cm}) - \Delta y] + \sum_{i=1}^{n_{kp}} (R_{0i} + R_i) \frac{h_i}{l_i} [(S \pm b_{cm}) + \\ &+ B_B - (\Delta y + b_i)] + \sum_{i=1}^{n_{kp}} (R_{0i} + R_i) \frac{b_i}{l_i} (h_i + h_z); \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_{op.y}^B = I_{ey} (h_{tt} + h_z) + I_{ez} [(S \pm b_{cm}) - \Delta y] + F_{rw} h_{rw}. \quad (4)$$

Здесь b_{cm} — смещение общего центра масс груза (знак плюс обозначает смещение в сторону внутренней, знак минус — в сторону наружной рельсовой нити), м; Δy — сдвиг груза поперек вагона, м; R_{0iy} и R_{0iz} — проекции усилий предварительных скруток проволоки крепления на поперечную и вертикальную оси, кН; R_{iy} и R_{iz} — проекции гибких элементов креплений одного направления на поперечную и вертикальную оси, кН; h_i — расстояние от пола вагона до грузовых прouшин (петель) груза, м; B_B — половина ширины вагона (для платформы 1440 или 1435 мм), м.

Отметим, что значения Δy , R_{0iy} и R_{0iz} , R_{iy} и R_{iz} , как и в [5, 6], вычисляются на основе [10]. Оговоримся, что в (2) и (4) из-за малости значений ($I_t < 1,0$ кН) не учтены Д'Аламберовы силы инерции порожнего вагона [3, 4].

В частном случае, когда груз от поперечного сдвига удерживается ($\Delta y = 0$) упорными элементами крепления другого направления (т.е. реакция бруска $R_{by,y} \neq 0$), из (1) и (3) исключаются R_{iy} и R_{iz} , но сохраняются R_{0iy} и R_{0iz} (т.е. $R_{0iy} \neq 0$ и $R_{0iz} \neq 0$, а $R_{iy} = R_{iz} = 0$).

Как известно [1, 4], коэффициент устойчивости η определяется отношением удерживающих и опрокидывающих моментов сил относительно одной из опор, и в технике обычно соблюдают условие $\eta > 1,25$.

Таким образом, на основе положений классической механики впервые выведены аналитические формулы удерживающих и опрокидывающих моментов сил, учитывающие смещение общего центра масс груза относительно продольной оси вагона (b_{cm}), сдвиг груза поперек вагона (Δy), усилия предварительных скруток проволоки крепления (R_{iy}) и гибких элементов креплений (R_i), которые позволили дать оценку устойчивости груза и/или вагона с грузом относительно одной из опор.

5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРИМЕРА РАСЧЕТА

Исходные данные: $b_{cm} = 0$ (т.е. без смещения); $G = 419$ кН; $G_t = 220$ кН; $G_0 = G + G_t = 639$ кН; $B_B = 1,435$ м; $S = 0,79$ м; $h_{tt} = 1,38$ м; $h_t = 0,8$ м; $H_{tto} = 2,04$ м; $h_{rwz} = 1,38$ м; $h_z = 1,31$ м; $h_{rw} = 2,69$ м; $l_{tp} = 1,435$ м; $I_{ey} = 217,9$ кН; $I_{ez} = 259,8$ кН; $v_B = 28,4$ м/с; $F_B = F_{rw} = 11,9$ кН; $\Delta y = 0,024$ м (после выдергивания крепежных элементов упорных брусков другого направления). Особо отметим, что поперечные и вертикальные силы инерции I_{ey} и I_{ez} , как и в [3, 4], найдены по значениям коэффициентов поперечной и вертикальной динамики вагона $k_{d,y}$ и $k_{d,z}$ (точнее, ускорения в долях от g) в виде $I_{ey} = k_{d,y} G$ и $I_{ez} = k_{d,z} G$ (в наших расчетах $k_{d,y} = 0,52$ и $k_{d,z} = 0,62$).

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Исследуем реальные случаи перевозки грузов, при которых естественным является сдвиг груза поперек вагона ($\Delta y \neq 0$), когда сохранены гибкие элементы крепления одного направления и полностью разрушены упорные элементы крепления другого направления, прибитые вплотную к боковой стороне груза. Поэтому здесь будут учтены проекции гибких элементов крепления одного направления R_i на поперечную и вертикальную оси,



т.е. $R_{iy} \neq 0$ и $R_{iz} \neq 0$ (см. рис. 1). Приведем результаты расчетов устойчивости груза относительно опоры A (η_{Ay}), которые представлены в виде макета-документа на основе (1) и (2).

$$\begin{aligned} \text{Муд1Ay} := & G \cdot (I_{rp} - \Delta y_01) + (R01 + Rn1) \cdot \left(\frac{h1}{l1} \right) \cdot [I_{rp} + B_v - (\Delta y_01 + b1)] \dots \\ & + (R01p + Rnp1p) \cdot \left(\frac{h1p}{l1p} \right) \cdot [I_{rp} + B_v - (\Delta y_01 + b1p)] \dots \\ & + (R02 + Rn2) \cdot \left(\frac{h2}{l2} \right) \cdot [I_{rp} + B_v - (\Delta y_01 + b2)] \dots \\ & \dots \\ & + (R08 + Rnp8) \cdot \left(\frac{h8}{l8} \right) \cdot [I_{rp} + B_v - (\Delta y_01 + b8)] \dots \\ & + (R08p + Rnp8p) \cdot \left(\frac{h8p}{l8p} \right) \cdot [I_{rp} + B_v - (\Delta y_01 + b8p)] \dots \\ & + \left[(R01 + Rn1) \cdot \frac{b1}{l1} \cdot h1 + (R01p + Rnp1p) \cdot \frac{b1p}{l1p} \cdot h1p \dots \right. \\ & \left. + (R02 + Rn2) \cdot \frac{b2}{l2} \cdot h2 + (R02p + Rnp2p) \cdot \frac{b2p}{l2p} \cdot h2p \dots \right] \\ & \dots \\ & + (R08 + Rnp8) \cdot \frac{b8}{l8} \cdot h8 + (R08p + Rnp8p) \cdot \frac{b8p}{l8p} \cdot h8p \end{aligned}$$

$\text{Муд1Ay} = 1.202 \times 10^3$ — удерживающий момент, кН.м

$\text{МопрAy} := I_{ey} \cdot h_{ct} + I_{ez} \cdot I_{rp} + F_{rw} \cdot h_{rw}$ — опрокидывающий момент, кН.м

$\text{МопрA} = 634.303$

$\eta_{Ay} := \frac{\text{МудAy}}{\text{МопрAy}}$ — коэффициент устойчивости груза относительно опоры A при сдвиге груза поперек вагона

$\eta_{Ay1} = 1.895$.

Отсюда следует, что в соответствии с заданными исходными данными, характеризующими состояние пути и учтываемыми через коэффициенты поперечной и вертикальной динамики вагона ($k_{dy} = 0,52$ и $k_{dz} = 0,62$), груз при его поперечном сдвиге является устойчивым относительно опоры A ($\eta_{Ay} = 1,892$, т.е. $\eta_{Ay} > 1,25$). Причем коэффициент η_{Ay} превышает допустимое значение более чем в 1,5 раза. Это объясняется тем, что груз удерживается от поперечного сдвига значительным количеством гибких (8 пар в каждом из направлений) и упорных (4 бруска и 20 крепежных изделий) элементов креплений. При этом обеспечивается гарантированная безопасность и надежность перевозочного процесса. В частном случае, когда $\Delta y = 0$, $R0_{iy} \neq 0$ и $R0_{iz} \neq 0$, значение $\eta_{Ay} = 1,65$, т.е. груз также находится в устойчивом состоянии ($\eta > 1,25$).

2. Покажем результаты расчета потери устойчивости вагона с грузом относительно опоры B , т.е. η_{By} , при сдвиге груза поперек вагона ($\Delta y \neq 0$), представляя их в виде макета-документа на основе (3) и (4).

$$\begin{aligned} \text{МудBy1} := & Go \cdot (S - \Delta y_01) + (R01 + Rn1) \cdot \left(\frac{h1}{l1} \right) \cdot [S + B_v - (\Delta y_01 + b1)] \dots \\ & + (R01p + Rnp1p) \cdot \left(\frac{h1p}{l1p} \right) \cdot [S + B_v - (\Delta y_01 + b1p)] \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + (R08 + Rnp8) \cdot \left(\frac{h8}{l8} \right) \cdot [S + B_v - (\Delta y_01 + b8)] \dots \\ & + (R08p + Rnp8p) \cdot \left(\frac{h8p}{l8p} \right) \cdot [S + B_v - (\Delta y_01 + b8p)] \dots \\ & + \left[(R01 + Rn1) \cdot \frac{b1}{l1} \cdot (h1 + hz) + (R01p + Rnp1p) \cdot \frac{b1p}{l1p} \cdot (h1p + hz) \dots \right] \end{aligned}$$

$$+ (R08 + Rnp8) \cdot \frac{b8}{l8} \cdot (h8 + hz) + (R08p + Rnp8p) \cdot \frac{b8p}{l8p} \cdot (h8p + hz)$$

$\text{МудBy1} = 1.146 \times 10^3$ — удерживающий момент, кН.м

$\text{МопрBy1} := I_{ey} \cdot (h_{ct} + hz) + I_{ez} \cdot (S - \Delta y_01) + F_{rw} \cdot h_{rw}$ — опрокидывающий момент, кН.м

$\text{МопрBy} = 770.676$

$\eta_{By1} := \frac{\text{МудBy1}}{\text{МопрBy1}}$ — коэффициент устойчивости вагона с грузом относительно опоры B при сдвиге груза поперек вагона

$\eta_{By1} = 1.499$

Анализируя результаты вычислений, отметим, что при таком состоянии пути, когда коэффициенты поперечной и вертикальной динамики вагона соответствуют значениям $k_{dy} = 0,52$ и $k_{dz} = 0,62$ [3], вагон с грузом является устойчивым ($\eta > 1,25$). В частном случае, когда $\Delta y = 0$, $R0_{iy} \neq 0$ и $R0_{iz} \neq 0$, значение $\eta_{By} = 1,22$, т.е. вагон с грузом устойчив ($\eta \approx 1,25$). При этом гарантированная безопасность и надежность перевозочного процесса, как и груза, обеспечена.

3. Исследуем случай, когда состояние пути (или скорость движения подвижного состава) можно имитировать различными сочетаниями значений коэффициентов поперечной и вертикальной динамики вагона (например, $k_{dy} = 0,52$ и $k_{dz} = 0,62$; $k_{dy} = 0,49$ и $k_{dz} = 0,57$; $k_{dy} = 0,46$ и $k_{dz} = 0,52$; $k_{dy} = 0,41$ и $k_{dz} = 0,49$; $k_{dy} = 0,36$ и $k_{dz} = 0,49$; $k_{dy} = 0,36$ и $k_{dz} = 0,46$; $k_{dy} = 0,3$ и $k_{dz} = 0,46$). При этом I_{ey} и I_{ez} в (2) и (4) также будут иметь различные значения [3, 4]. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает следующее.

1. На величину сдвига груза поперек вагона Δy превалирующее влияние оказывает состояние пути (имитируемое коэффициентами поперечной и вертикальной динамики вагона k_{dy} и k_{dz}), по которому проходит подвижной состав с некоторой скоростью. Заметим, что зависимости k_{dy} и k_{dz} от скорости движения подвижного состава могут быть зафиксированы на опытных участках железных дорог путеизмерительными вагонами, которые должны быть оснащены акселерометрами для измерения пространственных колебаний. Также установлено, что основное воздействие на сдвиг груза и на коэффициенты устойчивости груза и/или вагона с грузом оказывает коэффициент поперечной динамики вагона k_{dy} .

Таблица 1

Результаты вычислений коэффициентов устойчивости груза и вагона с грузом относительно одной из опор

$k_{d,y}$	$k_{d,z}$	$\Delta y, \text{м}$	$\Delta y = 0, R0_i > 0, R_i = 0$	$\Delta y > 0, R0_i > 0, R_i > 0$		
			η_A	η_B	η_A	η_B
0,52	0,62	0,024	1,7	1,25	1,95	1,53
0,49	0,57	0,016	1,82	1,34	2,0	1,55
0,46	0,52	0,008	1,97	1,43	2,07	1,56
0,41	0,49	0	2,08	1,53	2,04	1,54

2. Когда груз удерживается от сдвига поперек вагона ($\Delta y = 0$) предварительно скрученными гибкими элементами креплений одного направления ($R0_i > 0, R_i = 0$) из-за того, что либо отсутствуют упорные элементы другого направления, прибитые вплотную к боковой стороне груза, либо они полностью разрушены ($R_{бр,y} = 0$), собственно груз и вагон с грузом находятся в устойчивом состоянии со значительным запасом ($\eta >> 1,25$) при любых сочетаниях величин $k_{d,y}$ и $k_{d,z}$. При

этом, естественно, чем лучше состояние пути (т.е. чем меньше значения $k_{d,y}$ и $k_{d,z}$), тем груз и вагон с грузом более устойчивы ($\eta_A \approx 2,0$ и $\eta_B \approx 1,54$).

3. Груз и/или вагон с грузом устойчив ($\eta > 1,25$) при любых заданных величинах $k_{d,y}$ и $k_{d,z}$ когда имеет место сдвиг груза поперек вагона ($\Delta y > 0$) при сохранении гибких элементов креплений одного направления ($R0_i > 0, R_i > 0$). При этом значения $k_{d,y} = 0,41$ и $k_{d,z} = 0,49$, на наш взгляд, для заданных исходных данных соответствуют минимальным значениям, при которых состояние пути оценивается на отлично.

4. С увеличением сдвига груза поперек вагона коэффициенты устойчивости груза, и вагона с грузом снижаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье изложено аналитическое описание устойчивости груза и вагона с грузом при наличии поперечного сдвига и приведены результаты исследования устойчивости для конкретного груза, перевозимого на вагоне.

В перспективе рекомендуемая для практического применения новая методика расчета устойчивости груза (или вагона с грузом) может быть полезной при переработке действующей методики ТУ по размещению и креплению грузов на вагоне.

Литература

- Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Чуйкова О. Ю. Оценка устойчивости груза и вагона с грузом относительно одной из опор по методике ТУ // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 7. С. 17–24. ISSN 0236-1914.
- Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». М. : Планета, 2008. 191 с.
- Туранов Х. Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок : монография. Новосибирск : Наука, 2009. 376 с.
- Туранов Х. Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок : учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. Новосибирск : Наука; Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 447 с.
- Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д. Расчет продольного сдвига груза на вагоне и усилия в элементах крепления по новой методике на примере гусеничной техники // Наука и техника транспорта. 2013. № 3. С. 48–58.
- Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д., Молчанова О. В. Пример расчета поперечного сдвига гусеничной техники и усилия в элементах крепления по новой методике // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 10. С. 16–23. ISSN 0236-1914.
- Туранов Х. Т., Якупов А. Р., Ватонин А. А. Математическое моделирование рамных сил при движении грузового вагона с несимметрично размещенным грузом // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 11. С. 15–21. ISSN 0236-1914.
- Вычисления реакции рельсовых нитей при опускании нагруженного колеса на головку упорного рельса на основе построенных математических моделей / Х. Т. Туранов, А. Р. Якупов, А. А. Ватонин и др. // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 82–87. ISSN 1815-9400.
- Устройство для проверки надежности креплений груза в железнодорожном вагоне : пат. 2385812 Российская Федерация.
- Расчет продольного и поперечного сдвига груза на открытом подвижном составе и усилия в упругих элементах крепления : свид. об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ № 2013613992 Российская Федерация.

References

- Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Chuykova O. Yu. Otsenka ustoychivosti gruzu i vagona s gruzom otносительно odnoy iz opor po metodike TU [Assessment of stability of cargo and loaded car with respect to one of the supports according tot TU procedure] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2014. № 7. S. 17–24. ISSN 0236-1914.
- Prilozhenie 14 k SMGS «Pravila razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh» [Annex 14 to SMGS «Rules for stowing and securing cargo in rail cars and containers】. M. : Planeta, 2008. 191 s.
- Turanov Kh. T. Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh gruzovykh perevozok : monografiya [Theoretical mechanics in freight transport problems : monograph]. Novosibirsk : Nauka, 2009. 376 s.
- Turanov Kh. T. Teoreticheskaya mekhanika v spetsialnykh zadachakh gruzovykh perevozok : ucheb. posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transp. [Theoretical mechanics in special freight transport problems : a textbook for students of railway transport universities]. Novosibirsk : Nauka; Ekaterinburg : Izd-vo USURT, 2012. 447 s.
- Turanov Kh. T., Pserovskaya Ye. D. Raschet prodolnogo sdviga gruzu na vagonne i usiliya v elementakh krepleniya po novoy metodike na primere gusenichnoy tekhniki [Estimate of transverse cargo slippage in a car and forces in fasteners using the new method on the example of tracked vehicles] // Nauka i tekhnika transporta. 2013. № 3. S. 48–58.
- Turanov Kh. T., Pserovskaya Ye. D., Molchanova O. V. Primer rascheta poperechnogo sdviga gusenichnoy tekhniki i usiliya v elementakh krepleniya po novoy metodike [Sample estimate of transverse slippage in tracked vehicles and forces in fasteners using the new method] // Transport : nauka, tekhnika, upravlenie. 2013. № 10. S. 16–23. ISSN 0236-1914.
- Turanov Kh. T., Yakupov A. R., Vattonin A. A. Matematicheskoe modelirovanie ramnykh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona s nesimmetrichno razmeshchennym gruzom [Mathematical modeling of frame forces when moving freight wagon with asymmetric load] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2011. № 11. S. 15–21. ISSN 0236-1914.
- Vychisleniya reaktsii relsovikh nitey pri opuskaniyu nagruzhennogo kolesa na golovku upornogo relsa na osnove postroennykh matematicheskikh modeley [Analysis of reaction of rails when lowering the loaded wheel on rubbing rail head on the basis of developed mathematical models] / Kh. T. Turanov, A. R. Yakupov, A. A. Vattonin i dr. // Transport of the Urals. 2011. № 4. S. 82–87. ISSN 1815-9400.
- Ustroystvo dlya proverki nadezhnosti kreplenyi gruzu v zheleznodorozhnom vagonne [Apparatus for checking the reliability of securing cargo in a rail car] : pat. 2385812 Rossiyskaya Federatsiya.
- Raschet prodolnogo i poperechnogo sdviga gruzu na otkrytom podvizhnym sostave i usiliya v uprugikh elementakh krepleniya [Estimate of longitudinal and transverse cargo slippage in an open rolling stock and forces in elastic fasteners] : svid. ob ofits. registr. progr. dlya EVM № 2013613992 Rossiyskaya Federatsiya.

УДК 69.002.5

Сергей Алексеевич Румянцев, доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Константин Юрьевич Астанков, аспирант кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Владимир Анатольевич Ермаков, главный конструктор ООО Erde tools, Екатеринбург

ВИБРОПОГРУЖЕНИЕ СВАЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРАВНОВЕСНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Sergey Alexeyevich Rumyantsev, DSc in Engineering, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Konstantin Yuryevich Astankov, graduate student, Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Vladimir Anatolyevich Ermakov, Chief Designer, LLC Erde tools, Ekaterinburg

Vibration driving of piles using different types of non-equilibrium oscillations

Аннотация

В статье рассмотрены особенности и проблемы вибропогружения свай и шпунта в связанных грунтах.

Для повышения эффективности преодоления лобового сопротивления свай в связанных грунтах авторами предложены новая конструкция двухчастотного вибропогружателя и схемы его работы с возможностью генерации колебаний двух разных типов: в режиме разности скоростей движения вниз и вверх и в режиме разности величины вынуждающей силы, действующей по направлениям вверх и вниз.

Новая схема работы вибропогружателя основана на совместной работе двух пар дебалансов с различной частотой вращения, статических моментов и начальных фаз для разных пар дебалансов. Произведен анализ действия возмущающей силы исходного и измененного вибропогружателей. Рассмотрено изменение работы предлагаемой машины с изменением направления вращения дебалансов: в режиме погружения и извлечения свай. Приведены результаты расчета основных параметров и элементов вибропогружателя.

Ключевые слова: вибропогружение свай, двухчастотный вибропогружатель, вынуждающая сила, статический момент дебалансов, сопротивление связанных грунтов, неравновесные колебания.

Summary

The article describes specifics and issues of vibration driving of piles and piling bars in cohesive soils.

To improve the efficiency of overcoming point resistance of piles in cohesive soils the authors proposed a new design of dual-frequency vibratory pile driver and its operation scheme to generate oscillations of two different types: in differential up and down speed mode and in differential driving force mode acting upwards and downwards.

The new operation scheme of the vibratory pile driver is based on joint operation of two pairs of eccentric masses with different rotation speed, static moments and initial phases for different eccentric mass pairs. The action of the applied force of the original and modified vibratory drivers is analyzed. The change in operation of the proposed unit with change of rotating direction of eccentric masses is studied in pile sinking and pulling modes. The basic parameters and components of the vibratory driver are determined.

Keywords: vibratory pile driving, dual-frequency vibrator, driving force, static moment of eccentric masses, resistance of cohesive soils, nonequilibrium oscillations.

Свай и шпунт различных видов традиционно широко используются при строительстве искусственных сооружений железных дорог в качестве основных несущих конструкций и во вспомогательных целях на стадии производства работ: это устройство шпунтовых ограждений котлованов для сооружения опор мостов, устройство свайных оснований опор, сооружение подпорных стен и др. Погружение в грунт готовых свай осуществляется в основном двумя способами: ударами молота по свае или сообщением свае вибрационных колебаний вибропогружателями, установленными на ее голове. При выборе способа погружения и извлечения стального шпунта предпочтение обычно отдается вибропогружению как наиболее производительному и наименее опасному для повреждения шпунта.

Применение виброметода является более прогрессивным, поскольку позволяет существенно повысить производительность труда при устройстве шпунтовых ограждений и свайных фундаментов, в ряде случаев использовать более экономичные конструкции, комплексно механизировать строительные процессы, снизить расход металла и цемента, а также исключить или свести к минимуму шум и динамические воздействия на здания и сооружения, примыкающие к зоне производства работ.

Однако эффективность применения виброметода при устройстве шпунтовых ограждений и свайных фундаментов, как известно [1–5], в значительной мере зависит от грунтовых условий конкретной строительной площадки. При прохождении свайным элементом толщи плотных глинистых грунтов твердой и полутвердой консистенции отсутствует гарантия погружения сваи на требуемую глубину, а также возникает необходимость добивки сваи обычным молотом для обеспечения требуемой несущей способности, что связано с дополнительными затратами времени и средств подрядчика [6].

Основной принцип вибропогружения предусматривает многократное снижение сопротивления грунта по боковой поверхности сваи под действием вынуждающей периодической силы. На характер изменения свойств грунта влияет величина действующего динамического нагружения [5]. При слабых динамических воздействиях эффект вибрирования определяется упругими колебаниями системы с изменением напряженного состояния грунта около вибрирующей сваи, погружения в этом случае не происходит. При сильных же динамических воздействиях происходит разрушение структуры грунта и проскальзывание боковых поверхностей сваи по грунту. Установлено, что, после того как срыв произошел, сопротивление грунта поступательному движению сваи резко снижается, и для ее погружения достаточно приложить сравнительно небольшие внешние силы [1, 7]. Боковое сопротивление становится значительно меньше статического (в 2–4 раза в глинистых грунтах, в 4,5–6 раз — в водонасыщенных песках) [5].

Для успешного погружения свай необходимо преодолеть лобовое сопротивление грунта, которое в условиях плотных грунтов и большой площади поперечного сечения погружающего элемента может оказаться настолько большим, что достижение проектной отметки будет невозможным. Экспериментально установлено, что при вибропогружении в маловлажные пески и плотные глины снижения лобового сопротивления не наблюдается [4, 7].

Принцип работы обычного вибропогружателя, производящего гармонические колебания, заключается в следующем.

Посредством установленной в редукторе пары эксцентриков, вращающихся с одинаковой угловой скоростью в противоположных направлениях, генерируются гармонические колебания, направленные перпендикулярно к оси, на которой расположены центры вращения дебалансов, в данном случае — вертикально.

При вращении каждого из эксцентриков генерирует центробежные силы f_c . Горизонтальные составляющие f_h компенсируются, поскольку направлены в противоположные стороны, а вертикальные составляющие f_v складываются, образуя равнодействующую вынуждающей силы P (рис. 1).

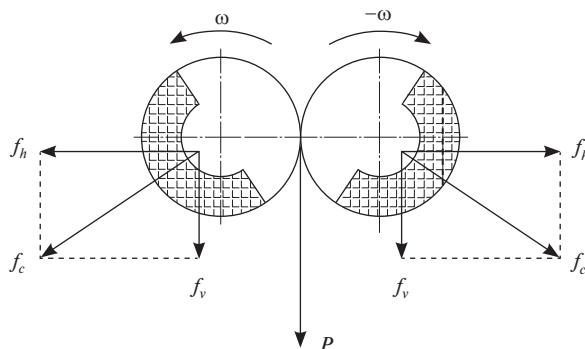


Рис. 1. Схема вибропогружателя

Для решения проблемы погружения свай в плотные глинистые грунты твердой и полутвердой консистенции авторами предложен принципиально новый метод — с использованием

машины, генерирующей колебания сложной формы. В настоящее время разработана конструкция вибропогружателя, ведется подготовка к проведению экспериментальной работы по погружению свай [7, 8].

Суть метода заключается в использовании неравновесных колебаний для разупрочнения связных грунтов и преодоления их лобового сопротивления. Конструкцией вибропогружателя реализована возможность генерации колебаний двух разных типов: первый — режим разности скоростей движения вниз и вверх, второй — режим разности величины вынуждающей силы, действующей по направлениям вверх и вниз.

Первый тип колебаний обеспечивается различной продолжительностью фаз нагружения и разгрузки за счет разности скорости движения вибропогружателя вверх и скорости его движения вниз в пределах одного цикла колебания.

Различные скорости нагружения и разгрузки реализуются при погружении сваи двухчастотной машиной, производящей негармонические колебания (рис. 2). Авторами рассматривается вариант движения дебалансов, исключающий недостатки применявшихся ранее двухчастотных вибропогружателей [9, 10]. Скорость вращения верхней пары валов должна быть вдвое больше нижней, а начальные фазы дебалансов верхней и нижней пар должны различаться на $\pi/2$, статический момент нижней пары дебалансов должен быть вдвое больше верхней. При этом соотношение вынуждающей силы для верхней и нижней пар дебалансов выражается таким образом:

$$P_1 = 2P_2 \quad (1)$$

Закон изменения возмущающей силы имеет следующий вид:

$$P = P_1 \sin(\omega t) - P_2 \sin(2\omega t), \quad (2)$$

где P_1 и P_2 — амплитуды возмущающих сил, развиваемых соответственно дебалансами нижних и верхних валов;

ω — угловая частота вращения нижнего вала.

Схема предлагаемого авторами вибропогружателя показана на рис. 2.

На рис. 3 представлены схемы движения дебалансов для случаев, описанных выше: извлечению сваи (см. рис. 3а) соответствует вращение дебалансов в разных направлениях, погружению (см. рис. 3б) — в одном направлении.

Характер возмущающей силы при работе вибропогружателя в режиме разности скоростей движения вниз и вверх представлен на графике (рис. 4), где буквами T_1 и T_2 обозначены промежутки времени, в течение которых происходит соответственно движение машины вниз и вверх. На рис. 4 хорошо видно различие промежутков T_1 и T_2 , их отношение составляет почти 0,5, т.е. скорость движения сваи вниз вдвое превосходит

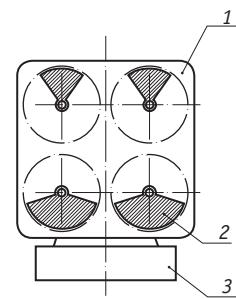


Рис. 2. Схема двухчастотного вибропогружателя:

1 — корпус; 2 — эксцентрик;
3 — свайный наголовник

скорость обратного хода. При изменении направления вращения только верхней пары дебалансов можно получить обратное соотношение скоростей: вниз — медленнее, вверх — быстрее.

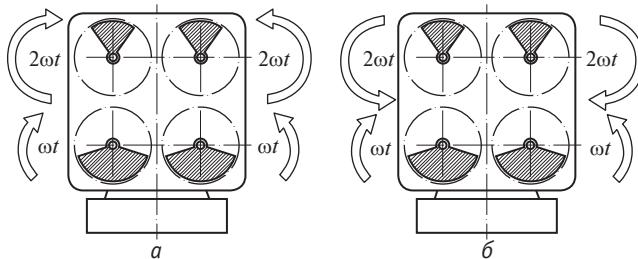


Рис. 3. Схема движения дебалансов:
а — при извлечении сваи; б — при погружении

В любом из описанных случаев максимальная величина вынуждающей силы не зависит от направления ее действия.

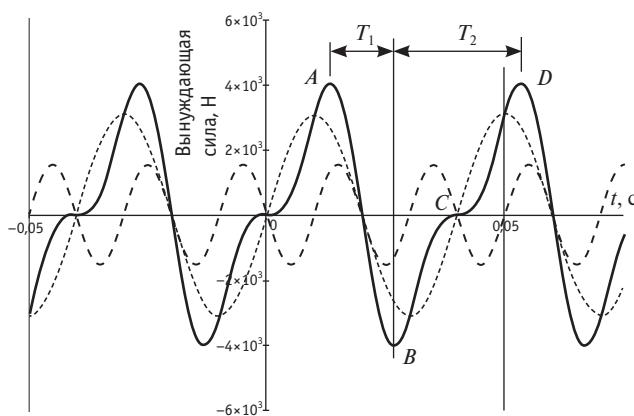


Рис. 4. График результирующей возмущающей силы
в режиме разности скоростей движения вниз и вверх

Второй тип колебаний заключается в создании вынуждающей силы разной величины: сила, действующая по направлению вниз, превышает величину вынуждающей силы, действующей вверх.

Такой режим движения машины достигается за счет разности фаз верхней и нижней пар дебалансов на $\pi/4$ радиан в сторону опережения нижней пары. Соотношение угловых скоростей вращения верхней и нижней пар дебалансов сохраняется, как и в первом случае, таким образом, чтобы скорость движения легких (верхних) дебалансов вдвое превосходила скорость вращения нижней пары. Суммарный статический момент нижней пары дебалансов должен быть в 4 раза больше, чем верхней. При этом соотношение вынуждающей силы для нижней (P_3) и верхней (P_4) пар дебалансов выражается таким образом:

$$P_3 = 4P_4. \quad (3)$$

Закон изменения возмущающей силы имеет следующий вид:

$$P = P_3 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) - P_4 \sin(2\omega t), \quad (4)$$

где ω — угловая частота вращения нижнего вала.

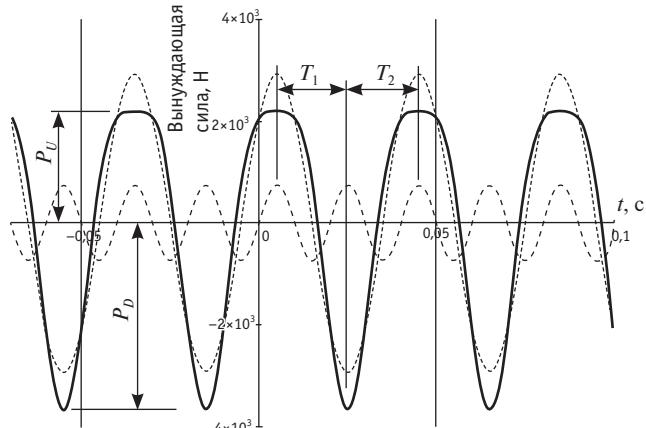


Рис. 5. График результирующей возмущающей силы
в режиме разных величин вынуждающей силы
при движении в противоположных направлениях

График изменения возмущающей силы по времени при работе вибропогружателя в режиме разных величин вынуждающей силы при движении вниз и вверх представлен на рис. 5, где буквами T_1 и T_2 обозначены промежутки времени, в течение которых происходит соответственно движение машины вниз и вверх. В этом случае они равны. Однако здесь проявляется разница величин вынуждающей силы, действующей по направлению вниз (P_D) и вверх (P_U), так, что P_D почти вдвое больше P_U . При изменении начальной фазы верхней пары дебалансов на π радиан можно получить увеличение вынуждающей силы в обратном направлении — так, что сила большей величины будет направлена вверх.

С целью подтверждения эффективности предлагаемого авторами метода вибропогружения разработана конструкция лабораторного образца вибропогружателя для проведения экспериментальной работы по погружению свай. Лабораторный образец установки предназначен для погружения легких свайных элементов: труб диаметром до 0,07 м, швеллера до № 8 и аналогичных профилей на глубину до 2 м. Он представляет собой блок из двух пар центробежных вибровозбудителей, заключенных в едином корпусе 1 (рис. 6) [11]. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала врачающиеся эксцентрики 2 закрыты кожухом.

Общий статический момент дебалансов составляет 1,06 Н·м. Общая масса вибратора — приблизительно 100 кг. Суммарная мощность всех электродвигателей — 3,0 кВт, частота вращения валов — 1500 и 3000 об./мин. Вынуждающая сила — 0,2 кН. Расчетная амплитуда колебаний при частоте 25 Гц в стандартном режиме составляет 4 мм.

Каждый эксцентрик 5 (рис. 7) установлен на валу соответствующего электродвигателя. Кратность частот вращения дебалансов обеспечена зубчатой передачей с передаточным числом

$i = 2$, сохраняющей постоянное соотношение между фазами вращения вибровозбудителей.

На основании выполненных расчетов определены технические параметры установки и режимы ее работы.

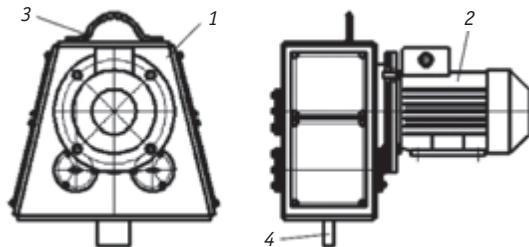


Рис. 6. Общий вид двухчастотного вибропогружателя:
1 — корпус; 2 — электродвигатель; 3 — строповое приспособление; 4 — кронштейн крепления сваи

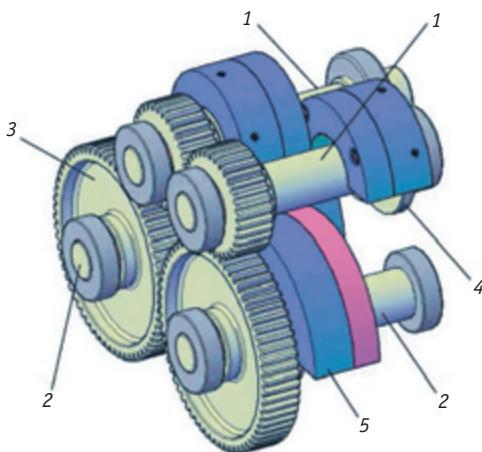


Рис. 7. Схема двухчастотного вибропогружателя:
1 — быстроходные валы; 2 — тихоходные валы;
3 — шестерни зубчатой передачи;
4 — универсальные диски; 5 — комплект дебалансов

Направление вращения правых дебалансов принято против часовой стрелки. Изменение направления вращения верхних дебалансов в первом типе колебаний заменено изменением их начальной фазы на $\pi/2$ рад. Эксцентрикситет дебаланса на верхнем валу принят равным 60, на нижнем — 90 мм. Верхний дебаланс совмещен с осью двигателя. Фаза 0° соответствует установке правого нижнего дебаланса справа на горизонтальной оси, отсчет углов — против часовой стрелки от положительного направления оси x (по тригонометрическому правилу).

Для исследования работы установки по двум моделям колебаний в режимах погружения и извлечения, а также в стандартном режиме гармонических колебаний всего определено пять режимов работы установки.

Режим 1. Погружение. Скорость движения вниз больше скорости движения вверх (рис. 8).

Общий статический момент дебалансов на двух верхних валах: $2 \cdot K_1 = 3,52$ кг·см, масса одного дебаланса $1,76/6 = 0,293$ кг.

Общий статический момент дебалансов на двух нижних валах: $2 \cdot 2 \cdot K_1 = 7,04$ кг·см, масса одного дебаланса $1,76 \cdot 2/9,5 = 0,370$ кг.

Начальная фаза нижнего дебаланса 0°, верхнего 180°.

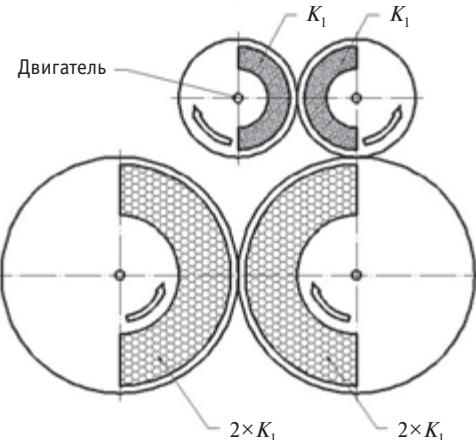


Рис. 8. Схема установки дебалансов в режиме 1

Режим 2. Извлечение. Скорость движения вверх больше скорости движения вниз (рис. 9).

Общий статический момент дебалансов на двух верхних валах: $2 \cdot K_1 = 3,52$ кг·см, масса одного дебаланса $1,76/6 = 0,293$ кг.

Общий статический момент дебалансов на двух нижних валах: $2 \cdot 2 \cdot K_1 = 7,04$ кг·см, масса одного дебаланса $1,76 \cdot 2/9,5 = 0,370$ кг.

Начальная фаза нижнего дебаланса 0°, верхнего 0°.

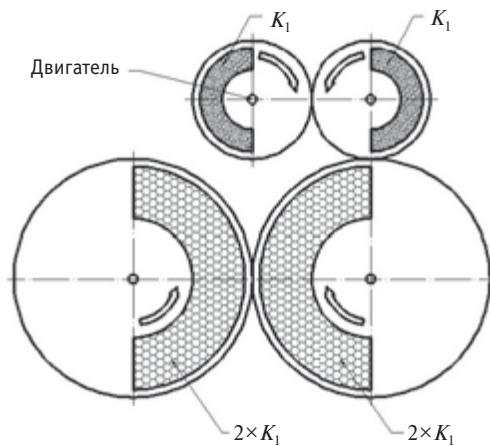


Рис. 9. Схема установки дебалансов в режиме 2

Режим 3. Извлечение. Суммарная вынуждающая сила вибропогружателя при движении вверх больше, чем при движении вниз (рис. 10).

Общий статический момент дебалансов на двух верхних валах: $2 \cdot K_3 = 2,11$ кг·см, масса одного дебаланса $1,056/6 = 0,176$ кг.

Общий статический момент дебалансов на двух нижних валах: $2 \cdot K_2 = 8,44$ кг·см, масса одного дебаланса $4,22/9,5 = 0,440$ кг.

Начальная фаза нижнего дебаланса 135°, верхнего 0°.

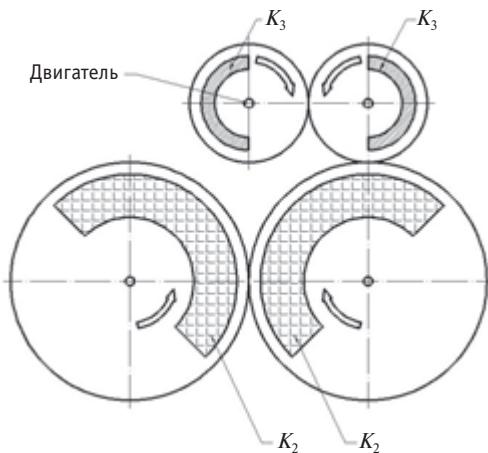


Рис. 10. Схема установки дебалансов в режиме 3

Режим 4. Режим стандартного вибропогружателя (рис. 11).

На верхних валах дебалансов нет.

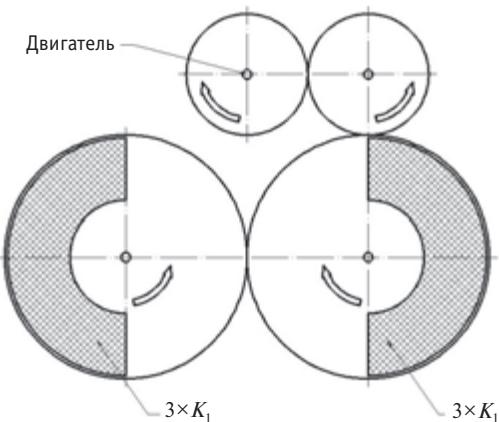
Общий статический момент дебалансов на двух нижних валах: $2 \cdot 3 \cdot K_1 = 10,56 \text{ кг}\cdot\text{см}$, масса одного дебаланса $1,76 \cdot 3 / 9,5 = 0,556 \text{ кг}$.

Рис. 11. Схема установки дебалансов в режиме 4

Литература

- Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М. : Госстройиздат, 1959. 315 с.
- Баркан Д. Д. Экспериментальные исследования погружения в грунт и выдергивания из грунта шпунта, труб, свай // Труды НИИ оснований и фундаментов. 1953. № 22.
- Азбелль Г. Г., Савинов О. А., Цейтлин М. Г. Вибрационные машины для погружения свай, шпунта и для геологического бурения // Вибрация в технике : справочник. М. : Машиностроение, 1981.
- Савинов О. А., Лускин А. Я. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве. Л. : Госстройиздат, 1960. 251 с.
- Цейтлин М. Г., Верстов В. В., Азбелль Г. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах. Л. : Стройиздат, 1987. 262 с.

Режим 5. Погружение. Суммарная вынуждающая сила вибропогружателя при движении вниз больше, чем при движении вверх (рис. 12).

Общий статический момент дебалансов на двух верхних валах: $2 \cdot K_3 = 2,11 \text{ кг}\cdot\text{см}$, масса одного дебаланса $1,056 / 6 = 0,176 \text{ кг}$ ($0,300 \text{ кг}$).

Общий статический момент дебалансов на двух нижних валах: $2 \cdot K_2 = 8,44 \text{ кг}\cdot\text{см}$, масса одного дебаланса $4,22 / 9,5 = 0,440 \text{ кг}$ ($0,758 \text{ кг}$).

Начальная фаза нижнего дебаланса 135° , верхнего 180° .

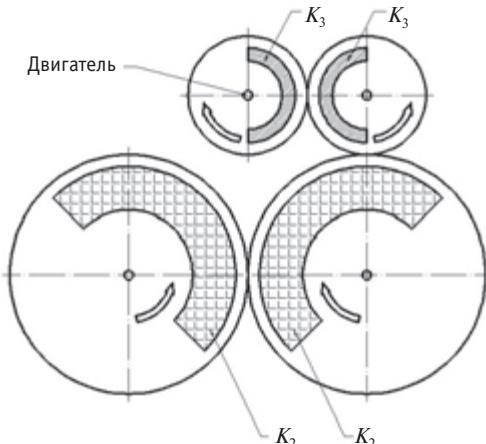


Рис. 12. Схема установки дебалансов в режиме 5

Предложенная конструкция двухчастотного вибропогружателя позволяет исследовать движение свай под действием импульсной нагрузки, реализованной в двух режимах: с разными скоростями нарастания и спада напряжений и с разными величинами вынуждающей силы, направленными в противоположных направлениях. Это особенно важно для оценки эффективности преодоления лобового сопротивления связных грунтов при вибрационном погружении и извлечении свайного элемента с использованием предлагаемого метода.

References

- Barkan D. D. Vibrometod v stroitelstve [Vibration method in construction]. M. : Gosstroyizdat, 1959. 315 s.
- Barkan D. D. Eksperimentalnye issledovaniya pogruzheniya v grunt i vydergivaniya iz grunta shpunta, trub, svay [Experimental studies of sinking and pulling out of soil piling bars, pipes, piles] // Trudy NII osnovaniy i fundamentov. 1953. № 22.
- Azbel G. G., Savinov O. A., Tseytlin M. G. Vibratsionnye mashiny dlya pogruzheniya svay, shpunta i dlya geologicheskogo burenija [Vibratory equipment for piling, sheet piling and for geological drilling] // Vibratsiya v tekhnike : spravochnik. M. : Mashinostroenie, 1981.
- Savinov O. A., Luskin A. Ya. Vibratsionny metod pogruzheniya svay i ego primenenie v stroitelstve [Vibratory pile driving method and its application in construction]. L. : Gosstroyizdat, 1960. 251 s.
- Tseytlin M. G., Verstov V. V., Azbel G. G. Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologiya v svaynykh i burovyykh rabotakh [Vibratory equipment and technology in piling and drilling operations]. L. : Stroyzidat, 1987. 262 s.

6. Rausche F. Modeling of Vibratory Pile Driving // Proceedings. International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soft Compaction. Laivain-La Neuve, 2002.
7. Румянцев С. А., Астанков К. Ю. Повышение эффективности преодоления лобового сопротивления связных грунтов при вибропогружении свай // Вестник УрГУПС. 2012. № 4 (16). С. 82–90. ISSN 2079-0392.
8. Румянцев С. А., Астанков К. Ю., Ермаков В. А. Разработка методики проведения испытания вибропогружения свай с использованием бигармонических колебаний // Вестник УрГУПС. 2013. № 4 (20). С. 18–25. ISSN 2079-0392.
9. Савинов О. А. Вибрационная техника в строительстве. Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1961. 35 с.
10. Татарников Б. П. Опыт и перспективы использования низкочастотных вибраторов в строительстве : доклад на совещании по индустриальным методам подготовки оснований и устройству фундаментов. Таллин, 1958.
11. Ермаков В. А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ВПА-1.00.000 ТО. Екатеринбург, 2013. 12 с.
6. Rausche F. Modeling of Vibratory Pile Driving // Proceedings. International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soft Compaction. Laivain-La Neuve, 2002.
7. Rumyantsev S. A., Astankov K. Yu. Povyshenie effektivnosti preodoleniya lobovogo sопrotivleniya svyaznykh gruntov pri vibropogruzhenii svay [Improving efficiency of overcoming point resistance of cohesive soils in vibratory pile driving] // Herald of USURT. 2012. № 4 (16). S. 82–90. ISSN 2079-0392.
8. Rumyantsev S. A., Astankov K. Yu., Ermakov V. A. Razrabotka metodiki provedeniya ispytaniya vibropogruzheniya svay s ispolzovaniem bigarmonicheskikh kolebaniy [Development of methodology for testing vibratory pile driving using biharmonic oscillations] // Herald of USURT. 2013. № 4 (20). S. 18–25. ISSN 2079-0392.
9. Savinov O. A. Vibratsionnaya tekhnika v stroitelstve [Vibration equipment in construction]. L. : Leningradskiy dom nauchno-tehnicheskoy propagandy, 1961. 35 s.
10. Tatarnikov B. P. Opyt i perspektivy ispolzovaniya nizkochastotnykh vibratorov v stroitelstve : doklad na soveshchanii po industrialnym metodam podgotovki osnovaniy i ustroystvu fundamentov [Experience and prospects of use of low-frequency vibrators in construction : report at the meeting on industrial methods of preparing beds and building foundations]. Tallin, 1958.
11. Ermakov V. A. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii VPA-1.00.000 TO [WPA-1.00.000.TO. Technical description and user manual]. Ekatерinburg, 2013. 12 s.

УДК 539.3

**Валерий Владимирович Струженов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Елена Александровна Бахарева, кандидат технических наук, инженер Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Екатеринбург**

ПРЕДЕЛЬНАЯ НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗАКРУЧИВАЕМЫХ ВАЛОВ ИЗ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

Valeriy Vladimirovich Struzhanov, DSc in Physics & Mathematics, Professor, Department of Higher and Applied Mathematics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Elena Alexandrovna Bakhareva, PhD in Engineering, Engineer, Institute of Engineering of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UB RAS IMASH), Ekaterinburg

Ultimate bearing capacity of torsion shafts made of softening material

Аннотация

Разработана методика расчета предельной несущей способности стержневых элементов на примере кручения стержней с круглым поперечным сечением. Методика может быть использована при проектировании нового поколения подвижного состава железных дорог с повышенной надежностью и безопасностью эксплуатации. Методика основана на включении в рассмотрение свойства материала (разупрочнение), которое ранее не учитывалось в расчетах на прочность.

Расчет предельных нагрузок осуществляется исходя из критерия потери устойчивости, отождествляемого с появлением микродефектов в материале. Исследование устойчивости процесса деформирования стержней из хрупких и пластичных разупрочняющихся материалов проведено с использованием метода исследования устойчивости по линейному приближению. Приведен пример, иллюстрирующий предложенную методику. Установлено, что методика существенно уточняет предельную несущую способность, вычисленную на основании традиционно используемых методов теории неупругого кручения.

Ключевые слова: круглые стержни, кручение, полная диаграмма деформирования, падающая ветвь, разупрочнение, линейное приближение, критическая нагрузка, устойчивость деформирования.

Summary

A method of analysis the ultimate bearing capacity of core elements based on the example of circular cross-section rod torsion. The methodology can be used in the design of new generation of railway rolling stock with increased reliability and operational safety. The methodology is based on consideration of those material properties (softening), which had not previously been taken into account in strength analysis.

Analysis of limit loads is carried out on the basis of the criterion of loss of stability, which is identified with the occurrence of micro-defects in the material. Investigation of the stability of the deformation process in rods made of brittle and plastic softening materials has been carried out using the method of investigating stability based on linear approximation. An example is given to illustrate the proposed methodology. It is found that the method significantly clarifies the ultimate bearing capacity estimated on the basis of the commonly used methods of the theory of inelastic torsion.

Keywords: round rods, torsion, complete stress-strain diagram, falling branch, softening, linear approximation, critical load, deformation resistance.

Надежность конструктивных элементов подвижного состава железных дорог оказывает существенное влияние на безопасность и безаварийность перевозок. Как правило, расчет на прочность и разрушение проводится по допускаемым напряжениям [1–3]. Максимальной нагрузкой считается та, при которой в наиболее напряженных областях деталей достигается предел прочности материала.

Однако расчет по допускаемым напряжениям приводит к неоправданно высоким запасам прочности и, следовательно, к увеличению материалоемкости изделий, а также не позволяет получить величину реальной несущей способности. Это связано с тем, что в момент достижения предела прочности материал не разрушается, а переходит в состояние разупрочнения (закритическую, неустойчивую стадию деформирования), которое характеризуется падающим участком диаграммы деформирования [4–7]. Материал на этой стадии обладает существенной поврежденностью микроструктуры элементов [8], а после разгрузки появляются большие остаточные напряжения [9]. Так как при разупрочнении сохраняется, хотя и ограниченная, способность материала воспринимать нагрузку, то учет разупрочнения позволяет вычислить значение реальной предельной нагрузки на изделие и найти реальный момент его разрушения.

В данной работе на примере кручения круглых валов, имеющих широкое применение в элементах подвижного состава, показана методика расчета критических нагрузок разрушения, основанная на введении в рассмотрение состояния разупрочнения материала. Методика может быть использована при проектировании деталей железнодорожного транспорта нового поколения, обладающих большой надежностью и живучестью при эксплуатации в сложных условиях.

Рассматривается стержень длины L с круглым поперечным сечением радиуса R . Деформирование осуществляется квазистатически при постоянной температуре посредством приложения монотонно возрастающего крутящего момента M . Примером таких элементов могут служить круглые валы, элементы

кузовных рам, используемые при строительстве подвижного состава и транспортной инфраструктуры [1, 2].

В случае кручения стержня единственной ненулевой компонентой тензора напряжений является касательное напряжение τ , а деформации сдвига линейно распределены по радиусу сечения $\gamma = \varphi r / L$ [10]. Здесь φ — угол закручивания, $0 < r \leq R$.

Свойства материала определяет зависимость между напряжениями и деформациями $\tau(\gamma)$ в координатах «касательные напряжения τ — сдвиговые деформации γ », обладающая восходящей (упрочнение) и падающей (разупрочнение) до нуля ветвями (рис. 1). Последняя характеризует закритическую стадию деформирования материала. Символами γ^B и γ^Z обозначены сдвиговая деформация предела прочности и сдвиговая деформация разрушения.

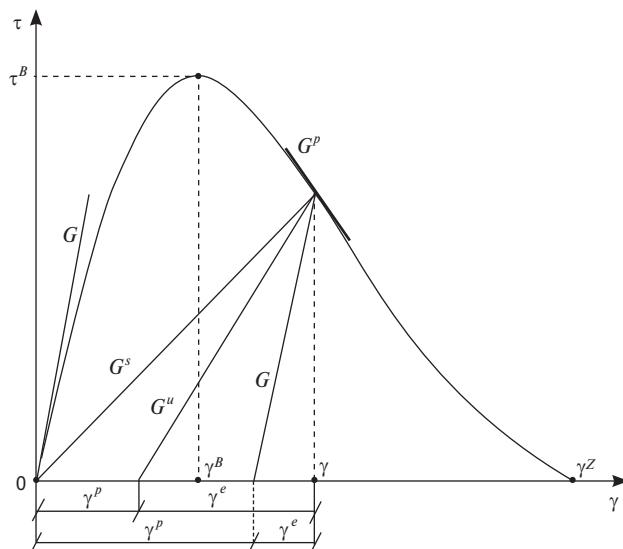


Рис. 1. Полная диаграмма деформирования и модули разгрузки для различных типов материалов

Полная диаграмма указывает на то, что существует потенциальная функция (потенциал напряжений) $\Pi(\gamma)$, монотонно возрастающая на отрезке $[0, \gamma^Z]$ и принимающая постоянное значение при $\gamma \geq \gamma^Z$, причем производная $\Pi_{,\gamma}(\gamma = 0) = 0$. Здесь и далее запятой будем обозначать в общем случае частную производную по переменной, обозначенной после запятой. На участке $[0, \gamma^B]$ функция Π выпукла вниз (вторая производная $\Pi_{,\gamma\gamma} \geq 0$), на участке $(\gamma^B, \gamma^Z]$ — выпукла вверх ($\Pi_{,\gamma\gamma} < 0$), а точка $\gamma = \gamma^B$ есть точка перегиба $\Pi_{,\gamma\gamma}(\gamma = \gamma^B) = 0$. Выпукłość вниз потенциальной функции отвечает устойчивым состояниям материала (упрочнение), выпукłość вверх — неустойчивым состояниям (разупрочнение), точка перегиба — пограничному состоянию.

Зависимость между касательными напряжениями и сдвиговыми деформациями теперь задает формула $\tau(\gamma) = \Pi_{,\gamma}$. Важной характеристикой материала является инкрементальный модуль сдвига $G^P = \Pi_{,\gamma\gamma} = \tau_{,\gamma}$ (модуль тангенциальной жесткости при кручении). На стадии упругости $G^P = G$ (G — модуль сдвига в упругости). Когда $G^P \geq 0$, материал находится на стадии упрочнения (рост сдвиговой деформации сопровождается

возрастанием сопротивления материала), при $G^P < 0$ — в состоянии разупрочнения (собственная неустойчивость материала, когда рост деформации сопровождается падением сопротивления). Если $G^P = 0$, то это пограничное состояние. Очевидно, что $d\tau = G^P d\gamma$. Отсюда получаем выражение

$$\tau(\gamma) = \int_0^\gamma G^P(\gamma) d\gamma,$$

которое является одной из форм определяющих соотношений.

Физический смысл введенного потенциала Π вытекает из равенства $\Pi = \int_0^\gamma \tau d\gamma$, представляющего собой работу напряжений, затраченную на деформирование. Тогда площадь под полной диаграммой численно равна работе, которую необходимо затратить на разрушение материала в условиях жесткого кручения при равновесном характере деформирования, сохраняющемся вплоть до разделения материального элемента на фрагменты [4].

Отклонение диаграммы деформирования от прямолинейного участка объясняется диссипативными процессами, происходящими в материале при деформировании. Обычно различают механическую диссипацию, осуществляемую пластической деформацией, и континуальное разрушение, характеризуемое поврежденностью, вызванной нарушением сплошности [4].

Будем различать три типа материалов в соответствии с классификацией, предложенной в работах [11, 12]. Во-первых, партiplастический (частично пластический) материал, в котором протекают оба типа диссипации: как механическая диссипация, так и множественное микроразрушение ($\gamma^P \neq 0, \omega \neq 0$). Здесь γ^P — пластическая составляющая сдвиговой деформации, ω — параметр, характеризующий поврежденность материала. Модуль разгрузки равен упругому модулю $G^U = \tau(\gamma) / \gamma^P = \tau(\gamma) / (\gamma - \gamma^P)$, $G^S \leq G^U \leq G$ (см. рис. 1). Свойства партiplастического материала определяют соотношения

$$\tau = G^U(\gamma - \gamma^P) = G(1 - \omega)(\gamma - \gamma^P), \quad (1)$$

где $G^U = G(1 - \omega)$ и, следовательно, $\omega = 1 - G^U/G$.

Уравнение для определения пластической составляющей полной деформации сдвига имеет вид [4]

$$\gamma^P = \gamma - \frac{\tau}{G^U} = \gamma - \frac{\Pi_{,\gamma}}{G^U} = \gamma - \int_0^\gamma \frac{G^P}{G^U} d\gamma. \quad (2)$$

Во-вторых, упругопластический материал, в котором диссипация происходит за счет образования и накопления пластических сдвиговых деформаций ($\gamma^P \neq 0, \omega = 0$, модуль разгрузки равен модулю сдвига G). Свойства упругопластического материала определяют соотношения

$$\tau = G(\gamma - \gamma^P), \quad \gamma^P = \gamma - \int_0^\gamma \frac{G^P}{G} d\gamma. \quad (3)$$

И, в-третьих, упругохрупкий материал, в котором диссипация происходит только за счет континуального разрушения ($\gamma^p = 0$, $\omega \neq 0$, модуль разгрузки равен секущему модулю $G^s = \tau/\gamma$). В этом случае справедливы соотношения

$$\tau = G^s \gamma = G(1 - \omega) \gamma, \quad \omega = 1 - \frac{G^s}{G}. \quad (4)$$

При любом распределении напряжений и деформаций по радиусу стержня, связанном с диаграммой $\tau(\gamma)$, где $\gamma = \varphi r/L$, тождественно удовлетворяются дифференциальные уравнения равновесия и условия совместности. Границные условия в случае мягкого нагружения имеют вид

$$u|_{z=0} = 0; \quad 2\pi \int_0^R \tau \cdot r^2 dr = M \quad (5)$$

(один из концов стержня закреплен, к другому приложен крутящий момент),
а в случае жесткого нагружения

$$u|_{z=0} = 0; \quad u|_{z=L} = \varphi r \quad (6)$$

(один конец закреплен, другому задан угол поворота). Здесь u — перемещение в тангенсальном направлении.

Рассмотрим сначала стержень из партиципастического материала, характеризующегося соотношениями (1) и (2), с разгрузкой, протекающей по упругому модулю $G^u = \tau(\gamma)/\gamma^e = \tau(\gamma)/(\gamma - \gamma^p)$. Перепишем второе уравнение (5), используя соотношение (1) для напряжений,

$$2\pi \int_0^R \tau r^2 dr = 2\pi \int_0^R G^u (\gamma - \gamma^p) r^2 dr = \\ = 2\pi \frac{\varphi}{L} \int_0^R G^u r^3 dr - 2\pi \int_0^R G^u \gamma^p r^2 dr = \varphi \frac{J^u}{L} - M^\Phi = M. \quad (7)$$

Здесь $J^u = 2\pi \int_0^R G^u r^3 dr$ имеет смысл, аналогичный жесткости упругого неоднородного стержня при кручении, состояния которого характеризуется модулями $G^u(\gamma)$, где $\gamma = \frac{\varphi r}{L}$ —

деформации сдвига с учетом диаграммы деформирования.

$$M^\Phi = 2\pi \int_0^R G^u \gamma^p r^2 dr = 2\pi \int_0^R G^u \left(\frac{\varphi r}{L} - \frac{1}{G^u} \int_0^{\varphi r/L} G^p(e) de \right) r^2 dr -$$

фиктивный скручающий момент, определяемый псевдоаналогиями $G^u \gamma^p$, где пластические сдвиговые деформации рассчитываются по закону (2).

Для анализа устойчивости положений равновесия стержня из партиципастического (1)–(2), упругопластического (3) или упругохрупкого (4) разупрочняющегося материала воспользуемся классическим методом исследования устойчивости по линейному приближению [13–14]. Рассмотрим положение равновесия стержня из партиципастического разупрочняющегося материала с параметрами φ_0 , M_0 , $G_0^p = G^p(\varphi_0 r/L)$, $G_0^u = G^u(\varphi_0 r/L)$.

Возмутим это равновесие, увеличив закручающий момент на малую величину $dM > 0$, и, используя формулу (7), запишем уравнение возмущенного равновесия

$$\varphi' = L \frac{M'}{J^u(\varphi')} + L \frac{M^\Phi(\varphi')}{J^u(\varphi')}. \quad (8)$$

Здесь $\varphi' = \varphi_0 + d\varphi$, $M' = M_0 + dM$.

$$M^\Phi(\varphi') = 2\pi \int_0^R G^u \left(\frac{r\varphi'}{L} \right) \times \\ \times \left[\frac{\varphi' r}{L} - \frac{1}{G^u(r\varphi'/L)} \int_0^{\varphi' r/L} G^p(e) de \right] r^2 dr = \\ = \frac{2\pi}{L} \int_0^R G^u \left(\frac{r\varphi'}{L} \right) (\varphi_0 + d\varphi) r^3 dr - \\ - 2\pi \int_0^R \left[\int_0^{\varphi_0 r/L} G^p(e) de + \int_{\varphi_0 r/L}^{\varphi' r/L} G^p(e) de \right] r^2 dr. \quad (9)$$

Получим линейное приближение уравнения (8). Для этого сначала разложим функцию $G^u(\varphi')$ в ряд Тейлора в точке равновесия и возьмем первый член, равный G_0^u . Затем разложим интеграл от переменного верхнего предела $\varphi' r / L$ в последнем слагаемом выражения (9). Так как первый член в разложении равен нулю, то используем второй (линейный) член, равный $G_0^p d\varphi r / L$. Тогда уравнение линейного приближения имеет вид

$$\varphi_0 + d\varphi = L \frac{M_0 + dM}{J_0^u} + L \frac{M^\Phi(\varphi_0) + M^\Phi(d\varphi)}{J_0^u},$$

$$\text{где } M^\Phi(\varphi_0) = 2\pi \int_0^R \left[G_0^u \frac{\varphi_0 r}{L} - \int_0^{\varphi_0 r/L} G^p de \right] r^2 dr;$$

$$M^\Phi(d\varphi) = 2\pi d\varphi \int_0^R (G_0^u / L - G_0^p) r^3 dr = \frac{d\varphi}{L} (J_0^u - 2\pi J_0^p),$$

где $J^P = \int_0^R G^p r^3 dr$ имеет смысл мгновенной жесткости стержня.

Точка (φ_0, M_0) — точка равновесия. Следовательно,

$$\varphi_0 = L(M_0 + M^\Phi(\varphi_0)) / J_0^u.$$

Окончательно получаем

$$d\varphi = L \frac{dM}{J_0^u} + d\varphi \left(1 - \frac{2\pi L J_0^p}{J_0^u} \right), \quad J_0^u \neq 0,$$

или

$$\frac{2\pi}{L} J_0^p d\varphi = dM. \quad (10)$$

Уравнение (10) имеет единственное решение, если $J_0^p \neq 0$. Причем малому приращению $dM > 0$ отвечает малое же приращение $d\varphi$, т.е. решение устойчиво (задача корректна по Адамару). Однако здесь следует различать два случая. Во-первых,

при $J_0^P > 0$ величина $d\phi > 0$. Тогда при малом догружении стержня с тангенциальной жесткостью J_0^P угол закручивания также возрастает на малую величину, и исследуемое положение равновесия устойчиво. Во втором случае, когда $J_0^P < 0$, из уравнения (10) находим, что $d\phi < 0$. Следовательно, после догружения стержня равновесие возможно, если уменьшается его угол закручивания (стержень раскручивается). Этот случай противоречит закону сохранения энергии. Данное равновесие недостижимо и в реальности не существует. Таким образом, равновесие стержня при $J_0^P < 0$ неустойчиво.

Наконец, если $J_0^P = 0$, то любому малому приращению dM отвечает бесконечное увеличение угла закручивания (задача некорректна по Адамару). Отсюда исходное положение равновесия неустойчиво.

Для упругопластического материала исследование устойчивости по линейному приближению проводится аналогично. Только $J_0^u = J_0 = \pi Gr^4 / 4 = \text{const}$. При $J_0^P \leq 0$ равновесие также неустойчиво.

Когда материал упругохрупкий, то $M^\Phi = 0$, и уравнение (8) имеет вид

$$\phi' = \frac{M'}{J^s(\phi')}. \quad (11)$$

Разлагая функцию $G^s(\phi')$ в ряд Тейлора, имеем

$$G^s(\phi') = G^s(\phi_0) + \left. \frac{dG^s}{d\phi} \right|_{\phi=\phi_0} d\phi + \dots \quad (12)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \frac{dG^s}{d\phi} &= \frac{dG^s}{d\gamma} \frac{d\gamma}{d\phi} = \frac{d}{d\gamma} \left(\frac{\tau}{\gamma} \right) \frac{d\gamma}{d\phi} = \frac{\tau' \cdot \gamma - \tau}{\gamma^2} \cdot \frac{r}{L} = \\ &= L \frac{G^P - G^s}{\varphi r} \cdot \frac{r}{L} = \frac{G^P - G^s}{\varphi}. \end{aligned}$$

В разложении (12) берем два первых члена, так как секущий модуль принципиально не может оставаться постоянным при догружении. Тогда

$$\begin{aligned} J^s &= 2\pi \int_0^R G^s \left(\frac{\varphi' r}{L} \right) r^3 dr = 2\pi \int_0^R G_0^s r^3 dr + \frac{2\pi}{\varphi_0} d\phi \int_0^R (G_0^P - G_0^s) r^3 dr = \\ &= J_0^s + \frac{2\pi J_0^P}{\varphi_0} d\phi - \frac{J_0^s}{\varphi_0} d\phi, \end{aligned}$$

и уравнение (11) преобразуется в равенство

$$\varphi_0 + d\phi = (M_0 + dM) \left(J_0^s + \frac{2\pi J_0^P}{\varphi_0} d\phi - \frac{J_0^s}{\varphi_0} d\phi \right)^{-1},$$

или

$$\begin{aligned} \varphi_0 J_0^s + J_0^s d\phi + 2\pi J_0^P d\phi + \frac{2\pi J_0^P}{\varphi_0} d\phi^2 - \\ - J_0^s d\phi - \frac{J_0^s}{\varphi_0} d\phi^2 = M_0 + dM. \end{aligned}$$

Пренебрегая квадратичными членами и учитывая, что в силу равновесия исходного состояния $J_0^s \varphi_0 = M_0$, окончательно получаем линейное приближение к уравнению возмущенного равновесия, которое совпадает с уравнением (10). Следовательно, результаты анализа устойчивости, приведенные выше, справедливы и для стержня из упругохрупкого материала.

Используем далее гипотезу академика Л. И. Седова, что разрушение есть явление того же порядка, что и невозможность равновесия [15]. Замечено [4–6, 8], что потеря устойчивости процесса деформирования сопровождается появлением микродефектов, которые при дальнейшем нагружении приводят к полному разрушению стержня. Поэтому условие потери устойчивости процесса деформирования

$$J^P = \int_0^R G^P(\varphi r / L) \cdot r^3 dr = 0 \quad (13)$$

круглого стержня при кручении можно рассматривать как критерий разрушения стержня.

Тогда алгоритм расчета предельной несущей способности стержня при кручении с учетом разупрочнения материала состоит из следующих этапов.

1. Задаются геометрические характеристики стержня (радиус R).

2. Определяется зависимость $\tau(\gamma)$, характеризующая свойства материала.

3. Находится функция касательного модуля $G^P = d\tau / d\gamma$, и выписывается условие потери устойчивости (13).

4. Уравнение (13) решается численно относительно угла закручивания ϕ .

5. Найденное значение ϕ подставляется во второе уравнение равновесия (5)

$$2\pi \int_0^R \tau(\varphi r / L) \cdot r^2 dr = M,$$

и определяется критический крутящий момент.

Проиллюстрируем предложенную методику для расчета критической нагрузки некоторого стержня, свойства материала которого определяет полная диаграмма деформирования в координатах «касательные напряжения — сдвиговые деформации», заданная функцией [16]

$$\tau(\gamma) = 2G(-\gamma^2 + 2\gamma^B \gamma),$$

где модуль сдвига $G = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\gamma^B = 0,045$.

Считаем, что материал разрушен при $\gamma > \gamma^Z = 0,09$. Касательный модуль диаграммы $\tau(\gamma)$ равен

$$G^P = \frac{d\tau}{d\gamma} = 4G(-\gamma + \gamma^B).$$

Определим критическую нагрузку круглого стержня длиной $L = 100$ мм и радиусом $R = 10$ мм. Уравнения равновесия и условие потери устойчивости (условие разрушения) имеют вид:

$$4\pi G \int_0^R (-\gamma^2 + 2\gamma^B \gamma) \cdot r^2 dr = M; \quad (14)$$

$$J^P = 4G \int_0^R (-\gamma + \gamma^B) \cdot r^3 dr = 0, \left(\gamma = \frac{\varphi r}{L} \right). \quad (15)$$

Решим уравнение (15) относительно угла закручивания φ . После преобразований получаем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} 4G \int_0^R \left(-\frac{\varphi r}{L} + \gamma^B \right) \cdot r^3 dr &= -\frac{4G\varphi}{L} \int_0^R r^4 dr + 4G\gamma^B \int_0^R r^3 dr = \\ &= -\frac{4GR^5}{5L} \varphi + GR^4 \gamma^B = 0. \end{aligned}$$

Подставляя в него числовые значения, находим величину критического угла закручивания

$$\varphi^* = -\frac{5L\gamma^B}{4R} = 0,5625 \text{ рад.}$$

Для определения критической нагрузки полученный параметр φ^* подставляем в формулу (14). После вычислений имеем $M^* = 15,896 \cdot 10^3 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Сравним полученный результат с расчетом по наибольшим напряжениям $[\tau] = \tau^B = 810 \text{ МПа}$ (касательные напряжения предела прочности) с использованием теории неупругого кручения [10], в которой полагается, что разрушение произойдет в крайних слоях стержня при $r = R$ при достижении сдвиговой деформации предела прочности $\gamma = \gamma^B = 0,045$. Тогда предельное значение угла закручивания определяется из уравнения

$$\gamma^B = \frac{\varphi_{[\sigma]} R}{L},$$

и $\varphi_{[\sigma]} = 0,45 \text{ рад}$. По формуле (14) критический закручивающий момент

$$M_{[\sigma]} = 4\pi G \int_0^R \left(-\left(\frac{\varphi_{[\sigma]} r}{L} \right)^2 + 2\gamma^B \frac{\varphi_{[\sigma]} r}{L} \right) \cdot r^2 dr = 15,2 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Полученное значение крутящего момента отличается от M^* на $\Delta = 100 - \frac{M^* \cdot 100}{M_{[\sigma]}} = 5\%$.

Отметим, что найденный предельный параметр стержня φ^* отвечает сдвиговой деформации $\gamma^* = \frac{\varphi^* R}{L} = 0,05625$ и напряжениям $\tau^* = \tau(\gamma^*) = 759,375 \text{ МПа}$. На диаграмме деформирования эти величины отвечают точке 2 (рис. 2), которая лежит на ее падающей ветви.

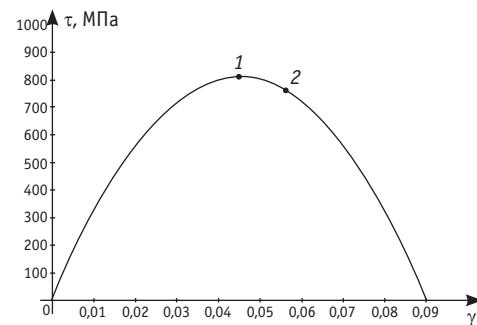


Рис. 2. Диаграмма деформирования и напряжения, отвечающая началу разрушения в стержне

Таким образом, в данной работе на примере задачи о кручении круглых валов из разупрочняющихся материалов проведено исследование устойчивости деформирования. Получен критерий потери устойчивости процесса. Показана возможность определения реальных критических нагрузок стержней. Установлено, что расчет традиционными методами сопротивления материалов дает заниженные значения предельного крутящего момента. Распространение данной методики на расчет крутящих моментов подвижного состава может привести к снижению запасов прочности и снижению их материалоемкости.

Выводы и методика расчета уточненной нагрузки, сформированные для кручения круглых стержней, качественно совпадают с результатами исследований критической нагрузки балочных элементов конструкций из разупрочняющихся материалов [17].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00186).

Литература

- Лукин В. В., Анисимов П. С., Котуранов В. Н. Конструирование и расчет вагонов. М. : ФГОУ «УМЦ», 2011. 688 с.
- Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации / МПС РФ. М., 2000. 196 с.
- Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
- Струженов В. В., Миронов В. И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург : УрО РАН, 1995. 190 с.
- Радченко В. П., Еремин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М. : Машиностроение-1, 2004. 265 с.
- Разработка экспресс-метода для контроля свойств вагонных сталей / В. И. Миронов, И. Г. Емельянов, А. В. Якушев // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 13–17. ISSN 1815-9400.
- Миронов В. И., Якушев А. В. Метод полных диаграмм в расчете ресурса элементов подвижного состава // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 60–64. ISSN 1815-9400.
- Волкова Т. А., Волков С. С. Кинетическая поврежденность макроструктуры металлов в элементах конструкций // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 21–25. ISSN 1815-9400.
- Бердников К. В., Струженов В. В. Остаточные напряжения в упругопластическом пространстве, возникающие после расширения сферической полости // Вестник УрГУПС. 2013. № 2 (17). С. 15–30. ISSN 2079-0392.
- Тимошенко С. П., Гере Дж. Механика материалов. М. : Мир, 1976. 669 с.
- Струженов В. В. Ассоциированный и инкрементальный законы пластического течения для сред, проявляющих деформационное разупрочнение // Известия УрГУ. 1998. № 10. С. 92–101. ISSN 1817-7174.
- Струженов В. В. Свойства разупрочняющихся материалов и определяющие соотношения при одностороннем напряженном состоянии // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2007. № 2 (15). С. 69–78. ISSN 2079-3308.
- Барбашин Е. А. Введение в теорию устойчивости. М. : Наука, 1967. 224 с.
- Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М. : Наука, 1967. 370 с.
- Седов Л. И. Механика сплошной среды. М. : Наука, 1970. Т. 1. 492 с.
- Струженов В. В., Бахарева Е. А. К расчету параметров равновесия и устойчивости процесса кручения круглых стержней из разупрочняющегося материала // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2012. № 2 (27). С. 53–64. ISSN 2079-3308.
- Струженов В. В., Бахарева Е. А. К расчету предельных параметров балочных элементов при чистом изгибе // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 24–27. ISSN 1815-9400.

References

- Lukin V. V., Anisimov P. S., Koturanov V. N. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Design and analysis of rail cars]. M. : FGOU «UMTs», 2011. 688 s.
- Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules of technical operation of railways of the Russian Federation] / MPS RF. M., 2000. 196 s.
- Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneyderovich R. M. Nesushchaya sposobnost i raschety detaley mashin na prochnost [Bearing capacity and strength analysis of machine components]. M. : Mashinostroenie, 1975. 488 s.
- Struzhanov V. V., Mironov V. I. Deformatsionnoe razuprochnenie materiala v elementakh konstruktsiy [Strain softening of materials in structural elements]. Ekaterinburg : UrO RAN, 1995. 190 s.
- Radchenko V. P., Eremin Yu. A. Reologicheskoe deformirovaniye i razrushenie materialov i elementov konstruktsiy [Rheological deformation and fracture of materials and structural elements]. M. : Mashinostroenie-1, 2004. 265 s.
- Razrabotka ekspres-metoda dlya kontrolya svoystv vagonnykh stalej [Development of a rapid method for controlling the properties of rail car steels] / V. I. Mironov, I. G. Emelyanov, A. V. Yakushev // Transport of the Urals. 2012. № 2 (33). S. 13–17. ISSN 1815-9400.
- Mironov V. I., Yakushev A. V. Metod polnykh diagramm v raschete resursa elementov podvizhnogo sostava [Complete diagram method in analysis of rolling stock components service life] // Transport of the Urals. 2007. № 2 (13). S. 60–64. ISSN 1815-9400.
- Volkova T. A., Volkov S. S. Kineticheskaya povrezhdennost mikrostruktury metallov v elementakh konstruktsiy [Kinetic damage of the microstructure of metals in structural elements] // Transport of the Urals. 2012. № 4 (35). S. 21–25. ISSN 1815-9400.
- Berdnikov K. V., Struzhanov V. V. Ostatochnye napryazheniya v uprugoplasticheskom prostranstve, voznikayushchie posle rasshireniya sfericheskoy polosti [Residual stresses in elastic-plastic space arising after the expansion of a spherical cavity] // Herald of USURT. 2013. № 2 (17). S. 15–30. ISSN 2079-0392.
- Timoshenko S. P., Gere Dzh. Mekhanika materialov [Mechanics of materials]. M. : Mir, 1976. 669 s.
- Struzhanov V. V. Assotsiirovanny i inkrementalny zakony plasticheskogo tetcheniya dlya sred, proyavlyayushchikh deformatsionnoe razuprochnenie [Associate and incremental laws of plastic flow for media displaying strain softening] // Izvestiya UrGU. 1998. № 10. S. 92–101. ISSN 1817-7174.
- Struzhanov V. V. Svoystva razuprochnayushchikhsya materialov i opredelyayushchie sootnosheniya pri odnoosnom napryazhennom sostoyanii // Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. nauki. 2007. № 2 (15). S. 69–78. ISSN 2079-3308.
- Barbashin Ye. A. Vvedenie v teoriyu ustoychivosti [Introduction to the theory of stability]. M. : Nauka, 1967. 224 s.
- Demidovich B. P. Lektsii po matematicheskoy teorii ustoychivosti [Lectures on mathematical theory of stability]. M. : Nauka, 1967. 370 s.
- Sedov L. I. Mekhanika sploshnoy sredy [Mechanics of continuous medium]. M. : Nauka, 1970. T. 1. 492 s.
- Struzhanov V. V., Bakhareva E. A. K raschetu parametrov ravnovesiya i ustoychivosti protsessa krucheniya kruglykh sterzhey iz razuprochnayushchegosya materiala [Regarding analysis of the equilibrium parameters and stability of torsion process of round rods made of softening material] // Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. nauki. 2012. № 2 (27). S. 53–64. ISSN 2079-3308.
- Struzhanov V. V., Bakhareva E. A. K raschetu predelnykh parametrov balochnykh elementov pri chistom izgibe [Regarding calculation of the limiting parameters of beam elements in pure bending] // Transport of the Urals. 2013. № 3 (38). S. 24–27. ISSN 1815-9400.

УДК 639.4.015

Иван Александрович Добычин, доктор технических наук, главный научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО», Екатеринбург,
Михаил Юрьевич Градинаров, научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО», Екатеринбург

МЕТОД ЛИНЕЙНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛЕЖКИ ТИПА 18-100 В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

Ivan Alexandrovich Dobychin, DSc in Engineering, Chief Researcher, Scientific and Production plant «TORMO», Ekaterinburg,
Mikhail Yuryevich Gradinarov, Research Scientist, Scientific and Production plant «TORMO», Ekaterinburg

Linear observers method in the study of type 18-100 bogie configuration in the movement

Аннотация

Статья посвящена созданию методики исследования геометрического поведения тележек грузовых вагонов типа 18-100 на основе использования датчиков линейного перемещения (называемых линейными наблюдателями) и разработанной ранее математической модели тележки. Составлена программа пересчета показаний датчиков, расположенных между телами тележки, в параметры, определяющие как взаимное положение тел тележки, так и ее конфигурацию в целом в процессе движения. Приведены примеры расчета некоторых геометрических характеристик тележки по показаниям линейных наблюдателей, полученным в результате опытной поездки тележки, оборудованной датчиками, в составе поезда.

Ключевые слова: тележка грузового вагона, датчики линейного перемещения, линейные наблюдатели, методика исследования тележки.

Summary

The article is devoted to creation of a methodology to study the geometric behavior of freight car bogies of type 18-100 based on the use of linear displacement transducers (called linear observers) and the previously developed mathematical model of the bogie. A program has been developed to translate indications of sensors located between bogie bodies into the parameters defining the relative position of bodies of the bogie and its configuration as a whole in motion. Examples of estimation of some geometrical characteristics of the bogie based on readings of linear observers are provided, obtained as a result of test ride of the bogie equipped with sensors as a part of the train.

Keywords: freight car bogie, linear displacement transducers, linear observers, bogie study technique.

Метод акселерометров, предложенный авторами в работах [1, 2], наиболее эффективен при оценке инерционной нагруженности отдельных элементов и составных тел подвижного состава. При определении же этим методом пространственных движений конкретного тела возникает проблема задания (определения) начальных условий движения и согласования этого движения с движением других тел системы, как правило, через уравнения связей, обусловливающих взаимное положение тел в процессе движения. В настоящей работе для определения взаимного положения составных тел тележки (надпрессорной балки, боковых рам и колесных пар) в процессе ее движения в составе поезда использованы штоковые датчики линейного перемещения, обеспечивающие измерение расстояния между точками закрепления их шарнирных концов (рис. 1). В дальнейшем указанные датчики (или им подобные) будем также называть линейными наблюдателями (или просто наблюдателями). Для определения в процессе движения конфигурации тележки в целом, включая ее параметры перекоса, такие как сдвиг, депланация и др. (вплоть до метрического тензора тележки), использована разработанная ранее математическая модель тележки [3, 4]. Авторами составлена программа пересчета показаний датчиков (наблюдателей), расположенных между телами тележки, в параметры, определяющие взаимное положение тел тележки и ее конфигурацию в целом в процессе движения. Приведены примеры расчета некоторых геометрических характеристик, определяющих конфигурацию тележки в процессе движения по показаниям наблюдателей, полученным в результате опытной поездки тележки, оборудованной системой наблюдателей, в составе поезда.



Рис. 1. Штоковый датчик линейного перемещения
итальянской фирмы Gefran

Настоящей публикацией авторы продолжают серию статей, посвященных разработке расчетно-экспериментальных методов исследования системы «экипаж — рельсовый путь» [1, 2] в рамках работ, проводимых в научно-производственном предприятии «Тормозное оборудование и системы».

РАЗМЕЩЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ НА ТЕЛЕЖКЕ

На рис. 2 приведена общая схема крепления линейных наблюдателей на тележке: по три наблюдателя между надпрессорной балкой и каждой из боковых рам (всего 6 шт.) и по два наблюдателя в каждом из буксовых узлов (всего 8 шт.).

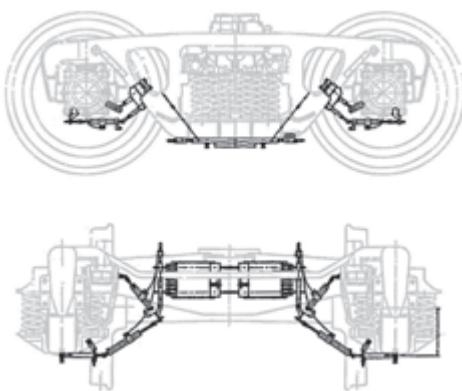


Рис. 2. Схема крепления линейных наблюдателей между деталями тележки

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕЖКИ

На рис. 3 представлена модельная схема перекошенной базовой площадки тележки в виде пространственного четырехугольника $A_{21}A_{11}A_{12}A_{22}$, образованного пересечением поперечных осей колесных пар A_jy_i с продольными осями боковых рам A^jx^j , и ее естественный аффинный репер $\{\vec{e}_A\} = (\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)^T$, порожденный диагоналями трех образующих параллелограммов, равными

$$\vec{e}_1 = \overline{A_2 A_1}; \quad \vec{e}_2 = \overline{A^2 A^1}; \quad \vec{e}_3 = \overline{A^* A_*}, \quad (1)$$

и ее декартовых реперов $\{\vec{e}\} = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})^T$, соответствующий декартовой системе координат тележки $Axyz$. Также показаны основные размеры и обозначения, в частности углы взаимного перекоса боковых рам $\alpha_\pi = (\vec{i}^1, \vec{i}^2)$ и колесных пар $\beta_\pi = (\vec{j}_1, \vec{j}_2)$, допускающие ввиду своей малости векторные представления:

$$\vec{\alpha}_\pi = \vec{\alpha}_2 - \vec{\alpha}_1; \quad \vec{\beta}_\pi = \vec{\beta}_2 - \vec{\beta}_1, \quad (2)$$

а также параметры перекоса тележки (γ — угол сдвига, Δ — депланация) и др. (см. рис. 3).

Орты декартова репера $\{\vec{e}\}$ связаны с ортами аффинного репера $\{\vec{e}_A\}$ соотношениями [3, 4]:

$$\vec{i} = \frac{\vec{e}_1}{|\vec{e}_1|}; \quad \vec{j} = (\vec{k} \cdot \vec{i}); \quad \vec{k} = \frac{(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2)}{|\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2|}. \quad (3)$$

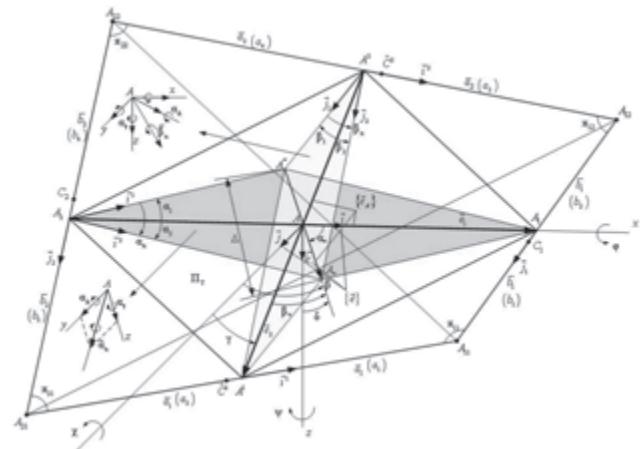


Рис. 3. Модельная схема перекошенной базовой площадки тележки и ее аффинный $\{\vec{e}_A\}$ и декартов $\{\vec{e}\}$ реперы (γ — угол сдвига, Δ — депланация)

Углы, входящие в (2), определяются в виде векторных произведений:

$$\begin{cases} \vec{\alpha}_v = \frac{(\vec{e}_1 \cdot \vec{i}^v)}{e_1}; & \vec{\beta}_v = \frac{(\vec{e}_2 \cdot \vec{j}^v)}{e_2}; \\ \vec{\alpha}_\pi = (\vec{i}^1 \cdot \vec{i}^2); & \vec{\beta}_\pi = (\vec{j}_1 \cdot \vec{j}_2). \end{cases} \quad (4)$$

Углы $\vec{\alpha}_v, \vec{\beta}_v$ в координатах $Axyz$ имеют вид:

$$\begin{cases} \{\vec{\alpha}_1\} = \begin{pmatrix} \alpha_{1x} \\ \alpha_{1y} \\ \alpha_{1z} \end{pmatrix} = -\frac{k_1+1}{4a} \begin{pmatrix} 0 \\ -\Delta \\ \frac{4}{\cos\gamma} \left(\frac{(k_2^2-1)b^2}{e_2} - \frac{(k_1^2-1)a^2}{e_1} \sin\gamma \right) \end{pmatrix}; \\ \{\vec{\beta}_1\} = \begin{pmatrix} \beta_{1x} \\ \beta_{1y} \\ \beta_{1z} \end{pmatrix} = -\frac{k_2+1}{4b} \begin{pmatrix} \Delta \cos\gamma \\ -\Delta \sin\gamma \\ \frac{4}{\cos\gamma} \left(\frac{(k_2^2-1)b^2}{e_2} \sin\gamma - \frac{(k_1^2-1)a^2}{e_1} \right) \end{pmatrix}; \\ \{\vec{\alpha}_2\} = -\frac{\{\vec{\alpha}_1\}}{k_1}, \quad \{\vec{\beta}_2\} = -\frac{\{\vec{\beta}_1\}}{k_2}, \end{cases} \quad (5)$$

где k_1, k_2 — безразмерные параметры;
 $2a, 2b$ — усредненные базы тележки (продольная и поперечная соответственно), определяемые в виде

$$\begin{cases} k_1 = \frac{a_2 + a_4}{a_1 + a_3} = \frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}; & k_2 = \frac{b_3 + b_4}{b_1 + b_2} = \frac{\bar{b}_2}{\bar{b}_1}; \\ a = \frac{1}{8} \sum (a_k^{\min} + a_k^{\max}); & b = \frac{1}{8} \sum (b_k^{\min} + b_k^{\max}), \end{cases} \quad (6)$$

и обозначено (см. рис. 3):

$$\begin{cases} \bar{a}_1 = \frac{a_1 + a_3}{2}; & \bar{a}_2 = \frac{a_2 + a_4}{2}; \\ \bar{b}_1 = \frac{b_1 + b_2}{2}; & \bar{b}_2 = \frac{b_3 + b_4}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

В качестве малых поступательных перемещений опорных площадок в буксовых узлах относительно друг друга в рамках зазоров выберем отклонения действительных размеров a_k , b_k от их средних базовых значений a , b в виде $a_k \Leftrightarrow a + \Delta_{ij}^a$, $b_k \Leftrightarrow b + \Delta_{ij}^b$, где Δ_{ij}^a , Δ_{ij}^b — продольные и поперечные отклонения соответствующих величин в узлах A_{ij} .

Векторные углы (5) входят в углы относительных поворотов собственных реперов $\{\vec{e}_{C_i}\}$ и $\{\vec{e}_{C_j}\}$ колесных пар и боковых рам относительно геометрического репера $\{\vec{e}\}$ (и $\{\vec{e}_C\} \Leftrightarrow \{\vec{e}\}$), которые определяются в виде ($i, j = 1, 2$):

$$\{\vec{\vartheta}_i^{(r)}\} = \begin{pmatrix} \varphi_i^{(r)} \\ \chi_i^{(r)} \\ \psi_i^{(r)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{ix} \\ -\chi + \beta_{iy} \\ \gamma + \beta_{iz} \end{pmatrix}; \quad \{\vec{\vartheta}_j^{(r)}\} = \begin{pmatrix} \varphi_j^{(r)} \\ \chi_j^{(r)} \\ \psi_j^{(r)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_j \\ \alpha_{jy} \\ \alpha_{jz} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где следует учесть выражения (5).

Угол галопирования тележки χ в (8) учитывает «запрет» на галопирование собственных систем координат колесных пар (реперов $\{\vec{e}_{C_i}\}$), а углы δ_j введены для учета относительных маятниковых движений (поворотов) боковых рам вокруг продольных осей.

Величины углов взаимного перекоса α_π , β_π связаны с величинами $e_1 = |\vec{e}_1|$, $e_2 = |\vec{e}_2|$ нелинейными соотношениями:

$$\begin{cases} e_1 = \frac{2a}{1+k_1} \sqrt{(1+k_1)^2 - k_1 \alpha_\pi^2}; \\ e_2 = \frac{2b}{1+k_2} \sqrt{(1+k_2)^2 - k_2 \beta_\pi^2}. \end{cases} \quad (9)$$

Используя векторные углы (5) и соотношения (9), можем с достаточной точностью получить выражения:

$$\begin{cases} \alpha_\pi \approx \alpha_\pi^0 = \frac{k_1+1}{2k_1a} \sqrt{\Delta^2 + 4 \left[\left(\frac{k_2-1}{k_2+1} \right) \frac{b}{\cos \gamma} - \left(\frac{k_1-1}{k_1+1} \right) a \operatorname{tg} \gamma \right]^2}; \\ \beta_\pi \approx \beta_\pi^0 = \frac{k_2+1}{2k_2b} \sqrt{\Delta^2 + 4 \left[\left(\frac{k_1-1}{k_1+1} \right) \frac{a}{\cos \gamma} - \left(\frac{k_2-1}{k_2+1} \right) b \operatorname{tg} \gamma \right]^2}; \\ e_1 \approx \frac{2a}{1+k_1} \sqrt{(1+k_1)^2 - k_1 (\alpha_\pi^0)^2}; \\ e_2 \approx \frac{2b}{1+k_2} \sqrt{(1+k_2)^2 - k_2 (\beta_\pi^0)^2}, \end{cases} \quad (10)$$

где γ — угол сдвига;
 Δ — депланация.

Отметим частный случай, когда $k_1 = k_2 = 1$. В этом случае:

$$\begin{cases} e_1 = \sqrt{4a^2 - \Delta^2}, & e_2 = \sqrt{4b^2 - \Delta^2}; \\ \alpha_\pi \approx \operatorname{tg} \alpha_\pi = \frac{\Delta}{e_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{4a^2 - \Delta^2}}; \\ \beta_\pi \approx \operatorname{tg} \beta_\pi = \frac{\Delta}{e_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{4b^2 - \Delta^2}}. \end{cases} \quad (11)$$

Выражения для углов (8) принимают простой вид:

$$\{\vec{\vartheta}_i^{(r)}\} = \begin{pmatrix} (-1)^i \frac{\beta_\pi}{2} \\ -\chi \\ \gamma \end{pmatrix}; \quad \{\vec{\vartheta}_j^{(r)}\} = \begin{pmatrix} \delta_j \\ (-1)^{j-1} \frac{\alpha_\pi}{2} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где α_π , β_π даны по (11).

Связь собственных реперов колесных пар и боковых рам с собственным репером тележки ($\{\vec{e}\} \Rightarrow \{\vec{e}_C\}$) определяется в виде:

$$\{\vec{e}_{C_i}\} = \Pi_C^i \{\vec{e}_C\}; \quad \{\vec{e}_{C_j}\} = \Pi_C^{j(r)} \{\vec{e}_C\}, \quad (13)$$

где $\Pi_C^i = \Psi_i^{(r)} X^T \Phi_i^{(r)}$, $\Pi_C^{j(r)} = \Psi^{j(r)} X^T \Phi^{j(r)}$ — матрицы сферических поворотов, определяемые углами (8) или (12), а репер $\{\vec{e}\}$ совпадает с репером $\{\vec{e}_C\}$ необressоренной части тележки, перенесенным в геометрический центр A (см. рис. 3) [4].

На рис. 4 показана схема расположения осей координат, характерных точек и обозначены некоторые размеры на деталях тележки.

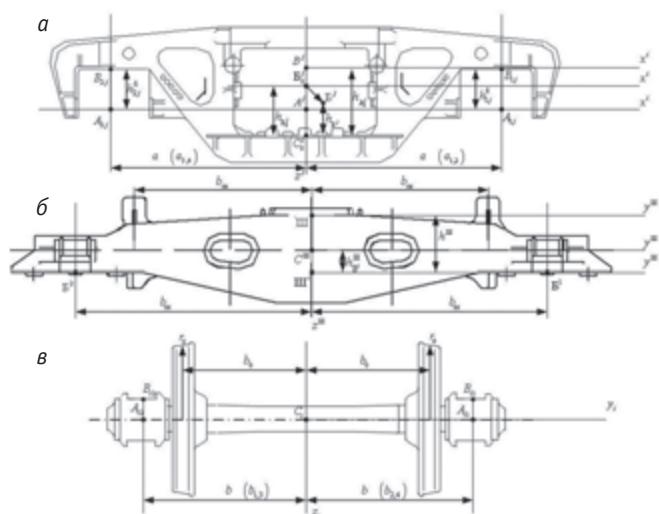


Рис. 4. Схема расположения осей координат, характерных точек и некоторые размеры на деталях тележки:
 a — боковые рамы; b — надпрессорная балка; c — колесные пары

Более подробно математическая модель тележки как изменяемого твердого тела с внутренними степенями свободы представлена в работах [3, 4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 5 представлена расчетная схема размещения линейных наблюдателей $\vec{l}_v = \overrightarrow{vv'}$ ($v = 1, \dots, 14$) между телами тележки, согласованная с математической моделью необressоренной части тележки, рассмотренной выше (шесть наблюдателей размещены между боковыми рамами и надрессорной балкой и восемь наблюдателей — между боковыми рамами и буксами). В процессе движения наблюдатели измеряют длины своих штоков $l_v = |\overrightarrow{vv'}|$, поэтому:

$$l_v = l_v(t); l_v(0) = l_v^0 \quad (v=1,2,\dots,14). \quad (14)$$

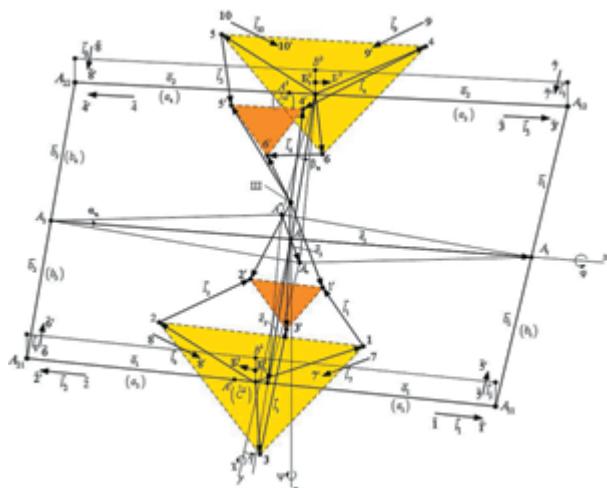


Рис. 5. Расчетная схема расположения линейных наблюдателей \vec{l}_v ($v = 1, \dots, 14$) между деталями тележки, согласованная с модельной схемой тележки

Перед установкой наблюдателей необressоренная часть тележки находилась в положении, близком к базовому, и были произведены все необходимые предварительные измерения геометрических размеров деталей тележки и зазоров (см. рис. 4). Точки крепления шарнирных концов M_v, M'_v , длины l_v^0 и свободные ходы штоков датчиков выбирались таким образом, чтобы обеспечить измерение расстояний $l_v(t)$ во всем диапазоне их возможных изменений в процессе движения.

Поставим следующую задачу: зная в процессе движения во времени показания линейных наблюдателей $l_v = l_v(t)$ ($v = 1, \dots, 14$), определим:

относительные перемещения опорных площадок боковых рам и опорных площадок на буксах (продольные Δ_{ij}^a и попеченные Δ_{ij}^b);

параметры перекоса тележки (угол сдвига γ и депланацию Δ), а также углы маятниковых отклонений боковых рам δ_j ($j = 1, 2$) относительно продольных осей $C^j x^j(A^j x^j)$;

конфигурацию необressоренной части тележки и положение надрессорной балки в координатах тележки $Axyz$, а также величины сжатия рессорных комплектов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ $\Delta_{ij}^a, \Delta_{ij}^b$

Относительные перемещения $\Delta_{ij}^a, \Delta_{ij}^b$ в боковых узлах определяем непосредственно через показания наблюдателей в соответствующих узлах $[l_v(t), v = 1, \dots, 14]$ в виде:

$$\begin{cases} \Delta_{11}^a = l_7(t) - l_7^0, & \dots, \Delta_{22}^a = l_{10}(t) - l_{10}^0; \\ \Delta_{11}^b = l_{11}(t) - l_{11}^0, & \dots, \Delta_{22}^b = l_{14}(t) - l_{14}^0 \end{cases} \quad (15)$$

(см. рис. 3 и 5) и далее определяем величины a_k, b_k ($k = 1, \dots, 4$) в виде $a_k(t) \Leftrightarrow a + \Delta_{ij}^a(t)$, $b_k(t) \Leftrightarrow b + \Delta_{ij}^b(t)$, где базовые значения a, b даны выражениями (6). Величины из формулы (7) и k_1, k_2 из формулы (6) примут вид:

$$\begin{cases} \bar{a}_1(t) = \frac{a_1(t) + a_3(t)}{2}; \bar{a}_2(t) = \frac{a_2(t) + a_4(t)}{2}; \\ \bar{b}_1(t) = \frac{b_1(t) + b_2(t)}{2}; \bar{b}_2(t) = \frac{b_3(t) + b_4(t)}{2}; \\ k_1(t) = \frac{\bar{a}_2(t)}{\bar{a}_1(t)}; k_2(t) = \frac{\bar{b}_2(t)}{\bar{b}_1(t)}. \end{cases} \quad (16)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НАДРЕССОРНОЙ БАЛКИ $\vec{u}_w^{(r)}, \vec{g}_w^{(r)}$

Точки крепления наблюдателей M_v, M'_v на боковых рамках и надрессорной балке соответственно описываются радиус-векторами $\vec{r}_v = \overrightarrow{AM}_v, \vec{r}'_v = \overrightarrow{AM}'_v$, и, следовательно, для наблюдателей \vec{l}_v справедливы соотношения

$$\vec{r}_v - \vec{r}'_v = \vec{l}_v \quad (v=1,2,\dots,6). \quad (17)$$

В координатах тележки $Axyz$:

$$\begin{cases} \{\vec{r}_v\}_A = \{\vec{r}_{A^j}\} + \Pi_{B^j}^A \{\overline{A^j B^j} + \overline{B^j M_v}\}, \\ \{\vec{r}'_v\}_A = \{\vec{r}_w^0 + \vec{u}_w^{(r)}\} + \Pi_w^A \{\overline{W' M_v}\}, \end{cases} \quad (18)$$

или в более подробной записи:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-1)^{j-1} \frac{e_2}{2} \sin \gamma \\ (-1)^{j-1} \frac{e_2}{2} \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} + \Pi_{B^j}^A \begin{pmatrix} 0 + x_v^j \\ 0 + y_v^j \\ -h^\delta + z_v^j \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} x_{v'} \\ y_{v'} \\ z_{v'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 + x_w^{\text{ш}} \\ 0 + y_w^{\text{ш}} \\ -h_w^{\text{ш}} + z_w^{\text{ш}} \end{pmatrix} + \Pi_w^A \begin{pmatrix} x_{v'}^{\text{ш}} \\ y_{v'}^{\text{ш}} \\ z_{v'}^{\text{ш}} \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (19)$$

где $v = 1, 2, 3$ при $j = 1$; $v = 4, 5, 6$ при $j = 2$;

x_v^j, y_v^j, z_v^j и $x_w^{\text{ш}}, y_w^{\text{ш}}, z_w^{\text{ш}}$ — координаты точек крепления наблюдателей M_v, M'_v в системах координат боковых рам $B^j x^j y^j z^j$ и надрессорной балки $W' x^{\text{ш}} y^{\text{ш}} z^{\text{ш}}$ соответственно;



e_2 дано выражениями (10);

γ — угол сдвига;

$H^\delta = \frac{\sum h_{ij}^\delta}{4}$ — средняя высота букс от осей колесных пар до опорных площадок (см. рис. 4);

$\{\bar{u}_w^{(r)}\} = (x^w, y^w, z^w)^T$ — относительное поступательное перемещение надрессорной балки;

$$h_{w'} = h^\delta - \frac{\sum (h_{B^j} - h_{B'_0})}{2};$$

$$\begin{cases} \Pi_{B^j}^A = \Psi_{\alpha_{jz}} X_{\alpha_{jy}} \Phi_{\delta_j}; \\ \Pi_{\text{ш}}^A = \Psi_{\psi^w} X_{\chi^w} \Phi_{\varphi^w} \end{cases} \quad (20)$$

матрицы сферических поворотов боковых рам и надрессорной балки на углы $\{\bar{\vartheta}^{j(r)}\} = (\delta_j, \alpha_{jy}, \alpha_{jz})^T$ [даны выражениями (8)] и $\{\bar{\vartheta}_{\text{ш}}^{(r)}\} = (\varphi^w, \chi^w, \psi^w)^T$ соответственно;

Ψ , X , Φ — матрицы поворотов вокруг осей Az , Ay , Ax соответственно [4].

Из векторных равенств (17) сформулируем шесть алгебраических уравнений в виде

$$(x_v - x_{v'})^2 + (y_v - y_{v'})^2 + (z_v - z_{v'})^2 = l_v^2(t), \quad (v=1, \dots, 6), \quad (21)$$

где $l_v(t)$ — показания наблюдателей (14), и следует учесть выражения (19).

Система шести уравнений (21) пока не замкнута, так как, кроме шести неизвестных перемещений x^w , y^w , z^w и φ^w , χ^w , ψ^w , включает в себя неизвестные параметры перекоса тележки γ , Δ и углы маятниковых отклонений боковых рам δ_1 , δ_2 (всего 10 неизвестных).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН СЖАТИЯ РЕССОРНЫХ КОМПЛЕКТОВ (ПЕРЕМЕЩЕНИЙ \bar{u}_{B^j})

Связь между надрессорной балкой и боковыми рамами осуществляется через точки опоры надрессорной балки на рессорные комплекты (см. точки B^j на рис. 4). Точки B^j в исходном положении тележки занимали положения B'_0 (для тележки в составе поезда положения точек B'_0 характеризуют положения статического равновесия рессорных комплектов). Векторы перемещения $\bar{B}'_0 \bar{B}^j = \bar{u}_{B^j} = (u_{B'x^j}, u_{B'y^j}, u_{B'z^j})^T$ представляют собой векторы сжатия рессорных комплектов (из положений B'_0), а $\{\bar{B}'_0 \bar{B}^j\} = (0, 0, h_{B'_0} - h_{B^j})^T$.

Уравнения связи между боковыми рамами и надрессорной балкой имеют общий вид $\overline{AA^j} = \overline{A^j B^j} + \overline{B^j B'_0} + \bar{u}_{B^j} = \overline{A \text{Ш}'} + \overline{\text{Ш}' B^j}$, или в более подробной записи в координатах $Axyz$

$$\{\bar{r}_{A^j}\} + \Pi_{B^j}^A \{\overline{A^j B'_0}\} + \bar{u}_{B^j} = \{\bar{r}_{w'}^0\} + \bar{u}_w^{(r)} + \Pi_{\text{ш}}^A \{\bar{r}_{B^j}\}. \quad (22)$$

Из уравнения (22) находим искомые перемещения \bar{u}_{B^j}

$$\{\bar{u}_{B^j}\} = \Pi_A^{B^j} \{\bar{u}_w^{(r)} + \bar{r}_{w'}^0 - \bar{r}_{A^j}\} + \Pi_{\text{ш}}^{B^j} \{\bar{r}_{B^j}\} - \{\overline{A^j B'_0}\}, \quad (23)$$

или в координатной форме

$$\begin{cases} u_{B'x^j} \\ u_{B'y^j} \\ u_{B'z^j} \end{cases} = \Pi_A^{B^j} \begin{cases} x^w + (-1)^j \frac{e_2}{2} \sin \gamma \\ y^w + (-1)^j \frac{e_2}{2} \cos \gamma \\ z^w - b_{w'} \end{cases} + \\ + \Pi_{\text{ш}}^{B^j} \begin{cases} 0 \\ (-1)^{j-1} b_{w'} \\ 0 \end{cases} + X_{\alpha_{jy}} \begin{cases} 0 \\ 0 \\ h^\delta \end{cases} - \begin{cases} 0 \\ 0 \\ |\bar{B}^j B'_0| \end{cases}, \quad (24)$$

где $|\bar{B}^j B'_0| = h^\delta - h_{B^j} + h_{B'_0}$ (см. рис. 4);

$$\begin{cases} \Pi_A^{B^j} = [\Pi_{B^j}^A]^T = \Phi_{\delta_j}^T X_{\alpha_{jy}}^T \Psi_{\alpha_{jz}}^T, \\ \Pi_{\text{ш}}^{B^j} = \Pi_A^{B^j} \Pi_{\text{ш}}^A = \Psi_{\psi^w - \alpha_{jz}}^T X_{\chi^w - \alpha_{jy}}^T \Phi_{\varphi^w - \delta_j}^T; \end{cases} \quad (25)$$

$2b_{w'}$ — база надрессорной балки.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СИСТЕМА АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Для определения неизвестных перемещений x^w , y^w , z^w , φ^w , χ^w , ψ^w и параметров γ , Δ , δ_1 , δ_2 через показания наблюдателей ($l_v(t)$, $v=1, \dots, 6$) имеем пока шесть равенств (21). Для составления недостающих соотношений воспользуемся связью между переменными \bar{u}_B и \bar{u}_{B^j} , учитывая, что точки B^1 , B^2 принадлежат и надрессорной балке как абсолютно твердому телу. Указанная связь с учетом малости углов относительного поворота надрессорной балки $\bar{\vartheta}_{\text{ш}}^{(r)}$ в векторной форме имеет вид

$$\bar{u}_{B^2} = \bar{u}_{B^1} + \bar{\vartheta}_{\text{ш}}^{(r)} \times \overline{B^1 B^2}, \text{ или в координатах } Axyz$$

$$\Pi_{B^2}^A \{\bar{u}_{B^2}\} = \Pi_{B^1}^A \{\bar{u}_{B^1}\} + \{\bar{\vartheta}_{\text{ш}}^{(r)} \times \overline{B^1 B^2}\}_A. \quad (26)$$

Далее учтем выражения для $\{\bar{u}_{B^j}\}$ (23), (24), примем, что $h_{B'_0} = h_B$, а маятниковые отклонения боковых рам синхронны ($\delta_j = \delta$), что подтверждено наблюдателями $\bar{l}_3(t)$, $\bar{l}_6(t)$ (см. рис. 5) в опытной поездке, учтем выражения для углов α_{jy} (5). В результате уравнения связи (26) примут более простой вид

$$\begin{cases} e_2 \sin \gamma - 4b_{w'} \psi^w + (H_{\text{ct}}^1 - H_{\text{ct}}^2) \delta = 0; \\ e_2 \cos \gamma - 2b_{w'} - \frac{(k_1 + 1)\Delta}{4k_1 a} [k_1 H_{\text{ct}}^1 + H_{\text{ct}}^2 - (k_1 + 1)(h_B - h^\delta)] = 0; \\ 4b_{w'} \varphi^w - \frac{(k_1 + 1)^2 \Delta}{4k_1 a} h^\delta + H_{\text{ct}}^1 - H_{\text{ct}}^2 = 0, \end{cases} \quad (27)$$

где e_2 дано выражениями (10) и учтено, что $h_{B'_0} = H_0^j - \lambda_{\text{ct}}^j = H_{\text{ct}}^j$ — высота j -го рессорного комплекта пружин в положении статического равновесия (см. рис. 4).

Обозначая левые части уравнений (21) через L_v ($v = 1, \dots, 6$), перепишем их в виде

$$L_v(\gamma, \Delta, \delta, x^w, y^w, z^w, \varphi^w, \chi^w, \psi^w, \dots) = l_v^2(t), \\ (v = 1, 2, \dots, 6). \quad (28)$$

Уравнения (28) совместно с уравнениями связей (27) представляют собой замкнутую систему девяти алгебраических уравнений относительно девяти искомых параметров ($\gamma, \Delta, \delta, x^w, y^w, z^w, \varphi^w, \chi^w, \psi^w$), решаяющую поставленную выше задачу.

В результате решения системы (27), (28) для моментов времени, согласованных с наблюдателями, получим законы изменения искомых параметров:

$$\begin{cases} \gamma = \gamma(t), \quad \Delta = \Delta(t), \quad \delta = \delta(t); \\ \{\bar{u}_w^{(r)}(t)\} = (x^w(t), y^w(t), z^w(t))^T; \\ \{\bar{\vartheta}_w^{(r)}(t)\} = (\varphi^w(t), \chi^w(t), \psi^w(t))^T. \end{cases} \quad (29)$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕЖКИ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

После определения на основе показаний наблюдателей $l_v(t)$ ($v = 1, \dots, 14$), законов изменения независимых перемещений $\Delta_j^a(t), \Delta_j^b(t)$ (15), параметров $\gamma(t), \Delta(t), \delta(t)$ и относительных перемещений надрессорной балки $\bar{u}_w^{(r)}(t)$ и $\bar{\vartheta}_w^{(r)}(t)$ (29) становится возможным определение любых геометрических характеристик, задающих конфигурацию тележки в процессе движения.

Так, вычислив $e_1(t), e_2(t)$ по формулам (10), находим углы относительных поворотов колесных пар $\bar{\vartheta}_j^{(r)}(t)$ и боковых рам $\bar{\vartheta}^{(r)}(t)$ по формулам (5), (8). Углы взаимных перекосов боковых рам $\alpha_\pi(t)$ и колесных пар $\beta_\pi(t)$ находим в окончательном виде по формулам [4]:

$$\begin{cases} \cos \alpha_\pi = \frac{e_1^2(t) - \bar{a}_1^2(t) - \bar{a}_2^2(t)}{2\bar{a}_1(t)\bar{a}_2(t)}; \\ \cos \beta_\pi = \frac{e_2^2(t) - \bar{b}_1^2(t) - \bar{b}_2^2(t)}{2\bar{b}_1(t)\bar{b}_2(t)}. \end{cases} \quad (30)$$

Отметим также углы взаимных перекосов между осями колесных пар и осями боковых рам π_{ij} [π_{ij} — углы при вершинах перекошенного базового четырехугольника тележки $A_{11}A_{12}A_{22}A_{21}$ (см. рис. 3)], которые в процессе движения изменяются по закону

$$\pi_{ij}(t) = \frac{\pi}{2} + \gamma_{ij}(t), \quad (31)$$

где $\gamma_{ij}(t)$ вычисляется по формулам [4]:

$$\begin{cases} \gamma_{11}(t) = \frac{e_1^2 + e_2^2 - 2e_1e_2 \sin \gamma - 4(\bar{a}_1^2 + \bar{b}_1^2)}{8\bar{a}_1\bar{b}_1}; \\ \gamma_{22}(t) = \frac{e_1^2 + e_2^2 - 2e_1e_2 \sin \gamma - 4(\bar{a}_2^2 + \bar{b}_2^2)}{8\bar{a}_2\bar{b}_2}; \\ \gamma_{12}(t) = \frac{e_1^2 + e_2^2 + 2e_1e_2 \sin \gamma - 4(\bar{a}_2^2 + \bar{b}_1^2)}{8\bar{a}_2\bar{b}_1}; \\ \gamma_{21}(t) = \frac{e_1^2 + e_2^2 + 2e_1e_2 \sin \gamma - 4(\bar{a}_1^2 + \bar{b}_2^2)}{8\bar{a}_1\bar{b}_2}, \end{cases} \quad (32)$$

в которых следует учесть зависимости от времени параметров, входящих в правые части.

Величины сжатия рессорных комплектов $\{\bar{u}_{B^j}(t)\} = (u_{B^j x^j}(t), u_{B^j y^j}(t), u_{B^j z^j}(t))^T$ в процессе движения определяются по формулам (24) с учетом зависимостей входящих в них параметров от времени. Отметим, что перемещения $\bar{u}_{B^j}(t)$ входят в силовые характеристики рессорных комплектов тележки, а углы $\pi_{ij}(t)$ — в силовые характеристики сопротивления перекашиванию тележки в боковых узлах, поэтому знание этих параметров необходимо при исследовании динамического поведения тележки в процессе движения.

Авторами была составлена компьютерная программа пересчета показаний наблюдателей $l_v(t)$, $v = 1, \dots, 14$, включая решение системы уравнений (27), (28), в указанные геометрические характеристики, определяющие конфигурацию тележки в процессе движения.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НЕКОТОРЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕЖКИ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

Для иллюстративного расчета выбран небольшой участок движения состава по времени в течение 40 с (с 4880 по 4920 с). На рис. 6 приведен соответствующий фрагмент записи показаний шести наблюдателей $l_v(t)$, $v = 1, 2, \dots, 6$. На рис. 7 и 8 показаны результаты расчета вертикальных сжатий рессорных комплектов от положения статического равновесия $u_{B^j z^j}(t)$, $j = 1, 2$ и относительного поперечного отклонения надрессорной балки $y^w(t)$ соответственно, а на рис. 9 — углы мятниковых боковых рам тележки, происходящих синхронно ($\varphi^{1(r)} = \varphi^{2(r)} = \delta(t)$). На рис. 10 представлено изменение во времени углов относительного галопирования боковых рам $x^{j(r)}(t)$, $j = 1, 2$, а на рис. 11 — изменение угла сдвига $\gamma(t)$. Из графиков рис. 10 также следует, что боковые рамы, а значит, и колесные пары перекошены относительно друг друга и имеет место депланация $\Delta(t)$. Действительно, расчеты показали, что депланация $\Delta(t)$ менялась в диапазоне $\Delta = 7,5\text{--}11,2$ мм, а углы взаимных перекосов боковых рам $\alpha_\pi(t)$ и колесных пар $\beta_\pi(t)$ (см. рис. 3) — в диапазонах $\alpha_\pi = 0,25\text{--}0,3$, $\beta_\pi = 0,23\text{--}0,28$. Надрессорная балка, как следует из графиков изменения вертикальных сжатий рессорных комплектов (см. рис. 7), двигалась с небольшой боковой качкой $\varphi^w(t)$ и значительным боковым отклонением $y^w(t)$, а вот угол ее виляния $\psi^w(t)$ практически совпал с углом перекоса $\gamma(t)$.

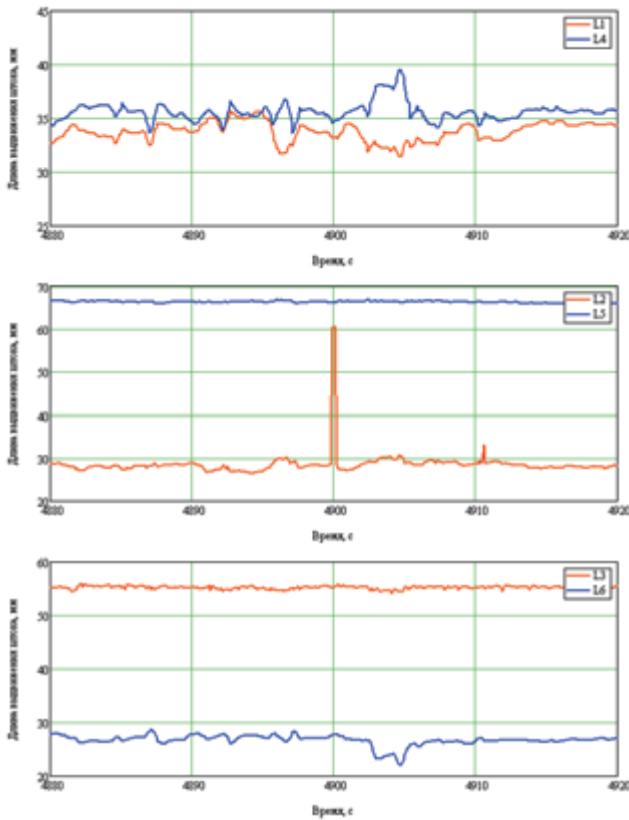


Рис. 6. Фрагмент записи показаний наблюдателей $L_v(t)$, $v = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (изменения длин измерительных штоков во времени)

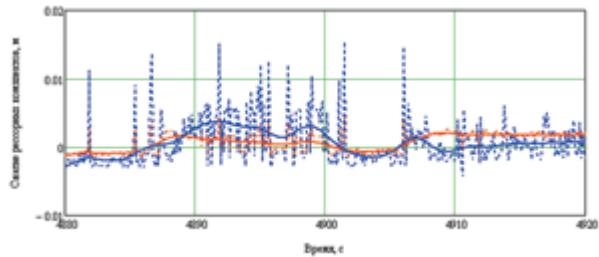


Рис. 7. Вертикальные сжатия рессорных комплектов от положения статического равновесия $u_{B^{j,r}}(t)$ ($j = 1, 2$)

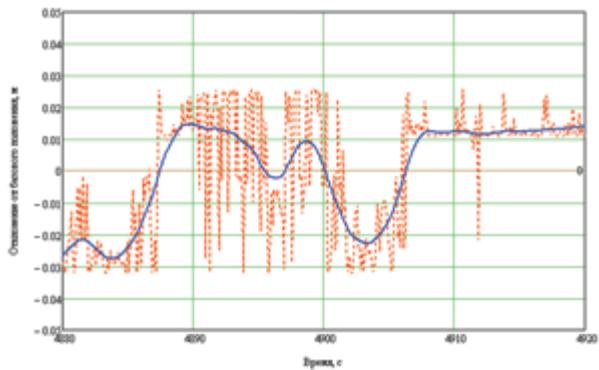


Рис. 8. Относительное поперечное отклонение надрессорной балки $u'''(t)$

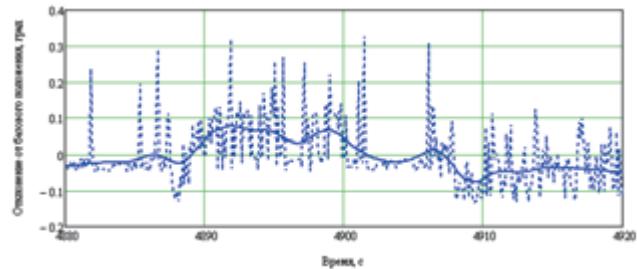


Рис. 9. Углы маятниковых отклонений боковых рам $\phi^{j(r)} = \delta(t)$ ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$)

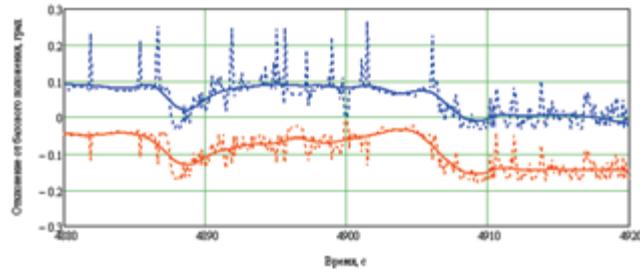


Рис. 10. Углы относительного галопирования боковых рам $\chi^{j(r)}(t)$ ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$)

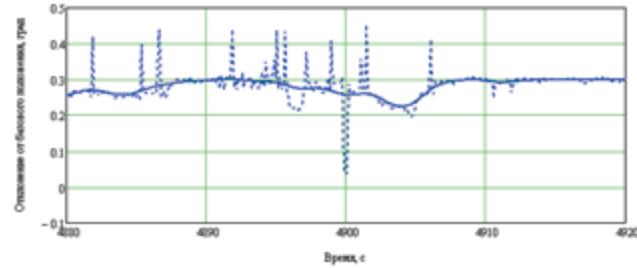


Рис. 11. Изменение угла сдвига $\gamma(t)$

ВЫВОДЫ

1. Предложен расчетно-экспериментальный метод исследования конфигурации тележки типа 18-100 в процессе движения, основанный на использовании линейных наблюдателей (штоковых датчиков линейного перемещения) и оригинальной математической модели необressоренной части тележки.

2. Получена замкнутая система разрешающих алгебраических уравнений и составлена компьютерная программа пересчета показаний линейных наблюдателей в параметры, определяющие конфигурацию тележки в процессе движения.

3. Приведены примеры расчета некоторых геометрических характеристик тележки в процессе движения, свидетельствующие в пользу корректности и адекватности разработанной математической модели и алгоритмов предложенного «метода линейных наблюдателей».

Литература

1. Добычин И. А., Градинаров М. Ю. Метод акселерометров в оценке инерционной нагруженности и определении пространственных движений элементов подвижного состава // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 38–44. ISSN 1815-9400.
2. Добычин И. А., Градинаров М. Ю. Особенности метода акселерометров при исследовании движения колесной пары // Вестник УрГУПС. 2014. № 1 (21). С. 14–29. ISSN 2070-0392.
3. Добычин И. А., Смолянинов А. В., Павлюков А. Э. Теоретические основы нелинейной механики рельсовых экипажей. Екатеринбург : Издатель Г. П. Калинина, 2009. 278 с. ISBN 978-5-901487-53-2.
4. Добычин И. А., Градинаров М. Ю. Кинематический анализ тележки грузового вагона как изменяемого твердого тела с внутренними степенями свободы // Вестник УрГУПС. 2012. № 2 (14). С. 14–33. ISSN 2070-0392.

References

1. Dobychin I. A., Gradinarov M. Yu. Metod akcelerometrov v otsenke inertsiyoy nagruzhennosti i opredelenii prostranstvennykh dvizheniy elementov podvizhnogo sostava [Accelerometer method when estimating inertial loading and defining space movement of rolling stock elements] // Transport of the Urals. 2014. № 1 (40). S. 38–44. ISSN 1815-9400.
2. Dobychin I. A., Gradinarov M. Yu. Osobennosti metoda akcelerometrov pri issledovanii dvizheniya kolesnoy pary [Specifics of accelerometers method in the study of the movement of the wheelset] // Herald of USURT. 2014. № 1 (21). S. 14–29. ISSN 2070-0392.
3. Dobychin I. A., Smolyaninov A. V., Pavlyukov A. E. Teoreticheskie osnovy nelineynoy mekhaniki relsovyykh ekipazhey [Theoretical foundations of nonlinear mechanics of railway vehicles]. Ekaterinburg : Izdatel G. P. Kalinina, 2009. 278 s. ISBN 978-5-901487-53-2.
4. Dobychin I. A., Gradinarov M. Yu. Kinematicheskiy analiz telezhki gruzovogo vagona kak izmenyaemogo tverdogo tela s vnutrennimi stepenyami svobody [Kinematic analysis of freight car bogie as a variable rigid body with internal degrees of freedom] // Herald of USURT. 2012. № 2 (14). S. 14–33. ISSN 2070-0392.

УДК 656.076.152

Дмитрий Иванович Хомич, ассистент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»
Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ТЯГОВЫХ РЕСУРСАХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РОССИИ

Dmitriy Ivanovich Khomich, Assistant, Department of Railway Stations and Junctions,
Petersburg State Transport University (PSTU)

Determining the need for traction Resources when carrying out works at the facilities of Russian railway infrastructure

Аннотация

Предложена методика определения потребного парка локомотивов и явочного штата локомотивных бригад, задействованных в хозяйственном движении, позволяющая оценить эффективность их использования, снизить издержки, связанные с простоем техники и поездов, и тем самым сократить эксплуатационные расходы отрасли.

При решении задачи использован метод коррекции эмпирических данных, полученных с полигона за предплановые годы работы. Задача рассмотрена в традиционной постановке, с учетом действующих норм и правил.

Ключевые слова: содержание инфраструктуры, локомотивные бригады, эксплуатируемый парк локомотивов, транспортировка путевых машин, график движения поездов, среднесуточный пробег локомотива.

Summary

A method is proposed to determine the required fleet of locomotives and real staffing of locomotive crews involved in economic movement, which allows to assess the effectiveness of their use, to reduce the costs associated with downtime of vehicles and trains, and thus to reduce the operating costs of the industry.

When solving the problem, a method of correction of empirical data obtained from the test range over the preplan years was used. The problem is considered in the traditional formulation, taking into account the existing rules and regulations.

Keywords: infrastructure maintenance, locomotive crews, operated fleet of locomotives, transportation of track machines, train schedule, average locomotive mileage.

Путевое хозяйство, как ведущая отрасль железнодорожного транспорта России, требует привлечения большого количества технических, людских и материальных ресурсов. На сегодняшний день эксплуатационные затраты на содержание путевого хозяйства превышают 50 % от общих эксплуатационных расходов ОАО «РЖД».

К числу наиболее значимых подразделений путевого хозяйства относятся предприятия по эксплуатации, обслуживанию и ремонту путевых машин тяжелого типа. Путевые машины задействованы практически на всех этапах текущего содержания и ремонта пути.

Конструкция некоторых путевых машин для обеспечения их работоспособности требует привлечения отдельной тяговой единицы, а также транспортировки между «фронтами» работ, в ремонт и обратно. В настоящее время в качестве тяговых единиц используются универсальные тяговые модули (УТМ), однако из-за их малого количества и недостаточной мощности возникает необходимость привлечения отдельных локомотивов. Проблемы, связанные с высокой потребностью в локомотивах, ставят их эффективное использование во всех видах движения на ведущее место.

В статье предложена методика определения потребного парка локомотивов и явочного штата локомотивных бригад, необходимых для обеспечения хозяйственного движения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ПАРКЕ ЛОКОМОТИВОВ

Действующие нормативно-технологические документы не в полной мере обеспечивают распределение парка локомотивов по полигонам по видам движения. При определении парка локомотивов учитывается их потребность, заложенная в нормативном графике движения поездов, а корректировка по месяцам определяется колебаниями грузооборота железной дороги. В связи с отсутствием заложенных в нормативном графике движения поездов транспортировок путевой техники и других ресурсов, необходимых для своевременного проведения работ, парк локомотивов, задействованных в хозяйственном виде движения,

может быть рассчитан только на основе эмпирических данных, полученных по результатам работы за прошлые годы [1].

Один из методов, позволяющих максимально точно определить потребный парк, излагается ниже.

Расчет потребного парка локомотивов определяется приоритетностью работ, которые разделяют на две группы:

ремонт пути (от усиленного капитального до подъемочного ремонта включительно) и других элементов инфраструктуры железных дорог;

движение хозяйственных поездов, не связанных с ремонтом и реконструкцией инфраструктуры (пересылка пассажирских вагонов, вагонов нерабочего парка в ремонт, работа снегоочистителей, пожарных и восстановительных поездов).

Расчет необходимого для этих целей локомотивного парка производится методом корректировки за отчетный период по каждому виду тяги отдельно:

$$N_{p,x} = \frac{N_{\text{э.х}} \cdot K_{\text{ср.и}}}{(1 - \alpha_{\text{н.х}})}, \quad (1)$$

где $N_{p,x}$ — локомотивный парк в распоряжении дороги, потребный на предстоящий год работы для обеспечения хозяйственного движения (по рассматриваемому виду тяги);

$N_{\text{э.х}}$ — ожидаемый эксплуатируемый среднесуточный локомотивный парк на год предстоящей работы для хозяйственного движения на рассматриваемом полигоне;

$K_{\text{ср.и}}$ — коэффициент перехода от ожидаемого эксплуатируемого среднесуточного парка локомотивов хозяйственного движения в году предстоящей работы к потребному парку исправных локомотивов в физических единицах;

$\alpha_{\text{н.х}}$ — доля локомотивов эксплуатируемого нерабочего парка и локомотивов неэксплуатируемого парка, принимается на уровне 0,05–0,12 и зависит от типа и серии локомотива.

Эксплуатируемый парк локомотивов зависит от ожидаемого объема работы хозяйственных локомотивов и ожидаемого уровня их использования. В качестве показателя объема работы в хозяйственном движении принимается общий пробег локомотивов в хозяйственном движении (локомотиво-километры) — объективный и универсальный, т.е. отражающий не только работу локомотивов по обеспечению ремонта и текущего содержания пути, включая работу на производственных базах ПМС, но и чисто поездную работу в хозяйственном движении.

В качестве показателя использования хозяйственных локомотивов принимается среднесуточный пробег локомотива хозяйственного движения. Исходя из этого эксплуатируемый среднесуточный на год предстоящей работы локомотивный парк для хозяйственного движения на дороге $N_{\text{э.х}}$ может быть найден по формуле

$$N_{\text{э.х}} = \frac{L_x}{T_p \cdot S_x}, \quad (2)$$

где L_x — общий пробег локомотивов в хозяйственном движении на предстоящий год работы в целом по полигону (по видам тяги);

T_p — расчетный период, сут (равен 365 сут в невисокосный и 366 сут — в високосный год);

S_x — среднесуточный пробег локомотива хозяйственного движения на предстоящий год работы в целом по полигону (по видам тяги).

Объем работы предстоящего года в хозяйственном движении L_x , если он не задан, можно определить при помощи экстраполяции данных статистического ряда объемов за 3–4 предплановых года подряд. Величина среднесуточного пробега локомотивов в хозяйственном движении S_x на предстоящий год работы принимается по наибольшему значению за 3–4 предплановых года подряд.

Среднесуточный пробег в хозяйственном движении не является отчетной величиной, но он может быть рассчитан по предплановым годам по формуле

$$S_{x,n} = \frac{L_{x,n}}{T_p \cdot N_{\text{э.х.п}}}, \quad (3)$$

где n — индекс, обозначающий любой предплановый год;

$N_{\text{э.х.п}}$ — принимается по статотчету рассматриваемого предпланового года.

Коэффициент перехода от ожидаемого в году предстоящей работы эксплуатируемого среднесуточного парка локомотивов хозяйственного движения дороги к потребному парку исправных локомотивов хозяйственного движения того же полигона в физических единицах определяется по формуле

$$K_{\text{ср.и}} = \frac{N_i}{N_{cc}}, \quad (4)$$

где N_i — наибольший потребный парк исправных локомотивов для хозяйственного движения в физических единицах за месяц максимальных перевозок предпланового года в хозяйственном движении на полигоне;

N_{cc} — среднесуточный парк за последний предплановый год работы на полигоне.

В случае отсутствия необходимых данных $K_{\text{ср.и}}$ можно принимать равным 1,22.

При работе локомотивов на производственных базах дистанций пути (ПЧ), механизированных дистанций пути (ПЧМ), путевых машинных станций (ПМС) и др. потребность в локомотивах рассчитывается по выражению

$$N_{p,x} = (365 - T_{\text{вых}}) \cdot Z_n \cdot \tau_n, \quad (5)$$

где 365 — число дней в году;

$T_{\text{вых}}$ — количество выходных и праздничных дней в году;

Z_n — количество предприятий;

τ_n — среднесуточный поток заявок на выделение локомотива от предприятий, для ПЧМ и ПМС $\tau_n = 0,7 - 0,8$, для ПЧ и других предприятий $\tau_n = 0,3 - 0,35$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЯВОЧНОГО ШТАТА ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД, ВОВЛЕННЫХ В ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Привлекаемый в хозяйственное движение явочный штат локомотивных бригад на предстоящие сутки определяется зависимостью

$$Z = \left(\frac{\sum L_{\text{тр-к.и.хоз}} \cdot \sum N_{\text{хоз}}}{L_{\text{бриг}}} \cdot K_{x,n} \right), \quad (6)$$

где Z — потребный штат локомотивных бригад, необходимый для выполнения работ, связанных с транспортировкой техники;

$\sum L_{\text{тр-к.и.хоз}}$ — расстояние транспортировки техники i -го направления, км;

$\sum N_{\text{хоз}}$ — количество хозяйственных поездов i -го направления;

$L_{\text{бриг}}$ — плечо обслуживания локомотивной бригадой, км;

$K_{x,n}$ — коэффициент, увеличивающий потребность локомотивных бригад, учитывающий факторы, связанные со спецификой транспортировки техники (ограничения по скорости, обусловленные конструкцией машин и механизмов, пропуск графиковых поездов и др.). На основе проведенных исследований можно принять $K_{x,n} = 1,02-1,3$.

Количество локомотивных бригад, задействованных в хозяйственном движении по заявкам дистанций пути (ПЧ), путевых машинных станций (ПМС), механизированных дистанций пути (ПЧМ), восстановительных поездов (ВП), дистанций энергоснабжения (ЭЧ), дистанций сигнализации и связи (ШЧ) и других подразделений, рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{N_{\text{раб}} \cdot t_{\text{раб}}}{7 \cdot K_y - 2(t_{\text{нак}} + t_{\text{след}})} \cdot K_{cm}, \quad (7)$$

где Z — потребное количество локомотивных бригад;

$N_{\text{раб}}$ — количество работ;

$t_{\text{раб}}$ — время работы согласно заявке, ч;

7 — нормативное время непрерывной работы локомотивной бригады, ч;

K_y — коэффициент возможного увеличения продолжительности работы локомотивной бригады до 12 ч в соответствии с нормативными документами, зависящий от протяженности плеча обслуживания ($K_y = 1-1,714$);

$t_{\text{нак}}$ — норма подготовительно-заключительного времени локомотивной бригады (предрейсовый медицинский осмотр, инструктаж, приемка, сдача локомотива и др.), ч;

$t_{\text{след}}$ — время следования от станции расположения депо или пункта оборота до места, указанного в заявке, в одном направлении, ч;

K_{cm} — коэффициент возможного увеличения потребности локомотивных бригад по причине, связанной с нарушением технологии выполнения работ, $K_{cm} = 1,05-1,25$.

На основе статистических данных, полученных от предприятий Октябрьской железной дороги, построен график максимальной потребности в локомотивном парке, привлекаемом для хозяйственного движения (рис. 1).

Как видно из рис. 1, потребность в различного рода локомотивах в течение сезона может меняться скачкообразно. Это обусловлено неравномерностью работ, их концентрацией в летний период, а также их объемами. Наименее загруженный период — с октября по февраль, когда потребность в локомотивном парке снижается в 2–2,5 раза и составляет 40–45 локомотивов в сутки. В этот период локомотивный парк

привлекается для работ, связанных со снегоборьбой, ликвидацией неисправностей пути, а также работой с вагонами-путеизмерителями, дефектоскопами, лабораториями контактной сети и другими, потребность в которых в течение сезона изменяется. Период с марта по октябрь характеризуется значительным ростом объемов работ, что требует привлечения локомотивного парка до 120 ед./сут. Такая большая потребность связана с привлечением парка для «турной» работы локомотивов, проведения ремонтных работ на полигоне, а также формирования поездов на производственных базах, с пересылкой пассажирских составов под дополнительную назначаемые поезда в сезон массовых перевозок. В этот период наиболее востребованы как маневровые, так и магистральные грузовые тепловозы [1–6].

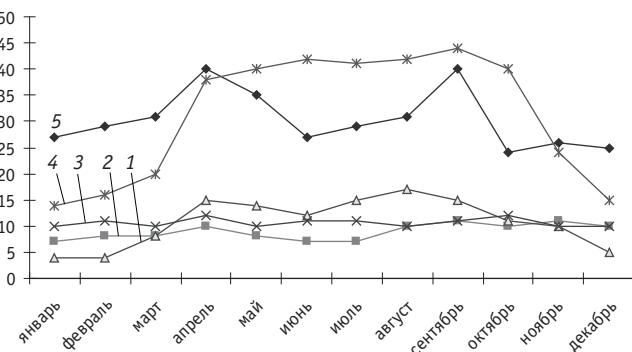


Рис. 1. Максимальная потребность в локомотивном парке,

задействованном в хозяйственном движении полигона:

1 — электровозы магистральные грузовые; 2 — электровозы магистральные пассажирские; 3 — тепловозы магистральные пассажирские; 4 — тепловозы магистральные грузовые; 5 — тепловозы маневровые

Транспортировка техники, в частности, выправочно-подбивочно-рихтовочного типа должна осуществляться на расстояния не менее 60 км отдельным локомотивом [5, 6]. Далеко не всегда техническое состояние машин позволяет им самим транспортироваться. Зависимости потребного количества локомотивов и локомотивных бригад, задействованных в перебазировании техники, представлены на рис. 2.

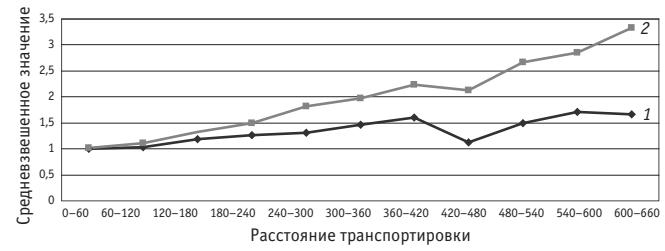


Рис. 2. Потребность в локомотивах (1) и локомотивных бригадах (2) при транспортировке путевых машин и комплексов

Как видно из рис. 2, потребность в локомотивах и локомотивных бригадах при расстоянии транспортировки более 360 км характеризуется значительным спадом. Это обусловлено привлечением для транспортировки техники на большие

расстояния магистральных локомотивов грузового движения, тяговые плечи которых достигают 1000 км, и локомотивных бригад, работающих, как правило, на плечах обслуживания 260–500 км, что позволяет не только сократить сроки транспортировки техники, но и эффективно использовать парк локомотивов и штат локомотивных бригад [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предлагаемой методики расчета в условиях дефицита локомотивов и локомотивных бригад позволяет более рационально распределить тяговые ресурсы по полигону, тем самым сократить издержки, связанные с транспортировкой техники, и в целом снизить транспортные расходы.

Литература

1. Методические указания по расчету потребности локомотивов, занятых в хозяйственном движении / МПС России. М., 1999.
2. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги» / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.05.12 № 757р.
3. Инструкция о порядке предоставления и использования «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ на железных дорогах ОАО «РЖД» / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.11.11 № 2560р.
4. Положение о реконструкции (модернизации) железнодорожного пути : постановление расширенного заседания коллегии ОАО «РЖД» от 14.01.09.
5. Инструкция о порядке обращения хозяйственных поездов, сформированных из специального железнодорожного подвижного состава / утв. МПС России 27.07.02 № ЦП-910.
6. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ / утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.12 № 2790р.
7. Хомич Д.И. Проблемы эксплуатации путевых машин тяжелого типа в условиях роста объемов грузовых и пассажирских перевозок // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч. трудов / Под ред. Ю.И. Ефименко ; ПГУПС. СПб., 2013. Вып. 12. 170 с.

References

1. Metodicheskie ukazaniya po raschetu potrebnosti lokomotivov, zanyatykh v khozyaystvennom dvizhenii [Guidelines for the calculation of the need for locomotives involved in commercial circulation] / MPS Rossii. M., 1999.
2. Polozhenie o sisteme vedeniya putevogo khozyaystva [Regulations on the system of maintenance of track facilities] / utv. rasporyazheniem OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» ot 02.05.12 № 757r.
3. Instruktsiya o poryadke predostavleniya i ispolzovaniya «okon» dlya remontnykh i stroitelno-montazhnykh rabot na zheleznykh dorogakh OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» [Instructions on the procedure for the provision and use of «windows» for the repair and construction and installation works on the railways of JSC Russian Railways] / utv. rasporyazheniem OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» ot 29.11.11 № 2560r.
4. Polozhenie o rekonstruktsii (modernizatsii) zheleznodorozhnogo puti [Regulations on the reconstruction (modernization) of railway track] : postanovlenie rasshirennogo zasedaniya kollegii OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» ot 14.01.09.
5. Instruktsiya o poryadke obrashcheniya khozyaystvennykh poezdov, sformirovannykh iz spetsial'nogo zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Instructions on the procedure of circulation of commercial trains formed of special rolling stock] / utv. MPS Rossii 27.07.02 № TsP-910.
6. Instruktsiya po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov pri proizvodstve putevykh rabot [Train traffic safety instructions during track works] / utv. rasporyazheniem OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» от 29.12.12 № 2790r.
7. Khomich D.I. Problemy ekspluatatsii putevykh mashin tyazhelogo tipa v usloviyakh rosta obyemov gruzovykh i passazhirskikh perevozok [Topical problems of operation of heavy track machines in the context of growth in freight and passenger traffic] // Aktualnye problemy upravleniya perevozochnym protsessom : sb. nauch. trudov / Pod red. Yu. I. Efimenko ; PGUPS. SPb., 2013. Vyp. 12. 170 s.

УДК 656.212:004.94

Роман Григорьевич Король, старший преподаватель кафедры «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск

Александр Сергеевич Балалаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИПОРТОВОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ С ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИМ ПОДХОДОМ К ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОСТУПАЮЩЕГО ВАГОНОПОТОКА

**Roman Grigoryevich Korol, Senior Lecturer, Department of Technology of Transport Processes and Logistics,
Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk,
Alexander Sergeyevich Balalaev, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Technology
of Transport Processes and Logistics, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk**

Simulation of port railway station operation using probabilistic and statistical approach to change in incoming traffic parameters

Аннотация

Рассмотрена технология обработки вагонопотока, поступающего на припортовую станцию с внешней сети и с причалов порта. Представлена функциональная схема работы припортовой станции с помощью динамических элементов — транзактов, которые имитируют момент поступления очередного вагона в систему. Разработана имитационная модель системы «железнодорожная станция — морской порт», которая позволяет определить максимальную перерабатывающую способность станции и продолжительность нахождения вагонов на станции и на причалах порта при заданном техническом оснащении в условиях неравномерности поступления вагонопотока.

Ключевые слова: имитационное моделирование, взаимодействие железнодорожной станции и морского порта, перерабатывающая способность станции, система транзактов, модель системы «станция — порт».

Summary

The technique for handling railcar traffic entering the port station from external network and port terminals is considered. The functional diagram of the port station is presented using dynamic elements — transacts, that mimic the arrival of a new car in the system. A simulation model of the system «train station — seaport» has been developed, which allows to determine the maximum capacity of the station and the duration of cars stay at the station and on port terminals taking into account specified technical equipment in the context of uneven car flow.

Keywords: simulation, interaction between train station and sea port, handling capacity of the station, transacts system, «train station — port» system model.

Современные станции и транспортные узлы представляют собой сложные системы, которые нельзя рассматривать отдельно по элементам — слишком сильно их взаимное нелинейное влияние. Параметры работы железнодорожных станций и транспортных узлов невозможно рассчитать по аналитическим формулам, потому что в системе существуют стохастические процессы, есть приоритеты обработки вагонов, внутренний параллелизм в обрабатываемых подсистемах, прерывание работы и т.д. Поэтому необходимо разрабатывать имитационные модели этих объектов, исследовать их работу при помощи экспериментов на модели и делать комплексную оценку полученных параметров. Для системы «железнодорожная станция — морской порт» следует использовать дискретно-событийное имитационное моделирование, модель должна быть непрерывной и динамической.

Имитационное моделирование работы системы «железнодорожная станция — морской порт» позволяет исследовать процесс переработки вагонопотока на станции и в порту. Этот процесс реализуется последовательностью следующих операций: прием поездов, их подготовка к расформированию, расформирование, подача вагонов на причалы порта, погрузочно-выгрузочные операции с вагонами на путях, уборка вагонов с путей порта, накопление составов новых назначений, их формирование, подготовка к отправлению и отправление. Для выполнения перечисленных операций предназначены функционально взаимодействующие элементы системы: входные участки, парк прибытия, сортировочный парк, вытяжки формирования, пути порта, парк отправления, выходные участки. Каждое из этих устройств обладает некоторыми параметрами. Так, парки станции характеризуются емкостью, соответствующей

количеству имеющихся путей определенной длины, достаточной для размещения необходимого числа вагонов, и т.п. Остальные устройства характеризуются еще и временем обслуживания поступивших вагонов, т.е. продолжительностью выполнения той или иной операции [1].

Сложность управления перегрузочными процессами в системе «станция — порт» определяется специфическими особенностями. Важнейшая из них — взаимодействие элементов управляемой системы, которыми, в частности, являются все объекты портового хозяйства (причалы, грузовые терминалы, перегрузочное оборудование и др.), транспортные средства (суда, вагоны, автотранспорт) и большое количество грузов различных типов.

Цель создания имитационной модели — установить, соответствуют ли параметры работы железнодорожной станции и порта (перерабатывающая способность, время нахождения вагонов на станции с расчленением по операциям, полная загрузка устройств терминала порта, железнодорожных путей) заданным параметрам в системе — увеличению прибывающего вагонопотока, проверить параметры работы станции в различных условиях (непринятие вагонов портом, увеличение количества прибывающих поездов и т.д.), определить резервы станции, устойчивость работы, предельное количество вагонов на путях станции. Результатом моделирования должно стать выявление условий, при которых станция не сможет функционировать и перерабатывать поступающий вагонопоток [2].

Транспортными единицами системы «станция — порт» являются составы вагонов. Интенсивность их поступления определяется числом вагонов, заполненных грузом и поступающих на станцию на расформирование в единицу времени. Вагоны описываются следующими параметрами:

типов;

родом перевозимого груза;

временем нахождения на объектах станции в ожидании технологических операций (приемо-отправочный парк, сортировочный парк, пути порта);

временем на погрузку, выгрузку на путях порта.

Исходными данными для модели служат: технические характеристики станции (ее компоновка, количество путей в парках, вместимость путей), количество причалов (вместимость грузовых фронтов), характеристики входящих потоков, временные параметры — осмотр бригадами ПТО, время на грузовые операции, время на маневровые операции (расформирование составов, формирование и сборка групп вагонов, перестановки из парка в парк).

Для железнодорожной станции входящим потоком является подход поездов.

В модели работы припортовой станции происходит движение вагонов, отображающее перемещения в моделируемом объекте. Такие элементы в имитационном моделировании называются транзактами [2]. По способу описания динамики объекта моделирования процесс переработки вагонопотока в системе «железнодорожная станция — морской порт» может быть представлен с помощью транзакта (рис. 1).

Технология описывается на уровне операций (прием поезда, расформирование состава, выгрузка вагонов), т.е. техно-

логический процесс представляет собой последовательность операций и набор условий, после выполнения одних из которых начинаются другие (в сортировочном парке накопился состав, начинается операция формирования и т.п.). Вагонопоток-транзакт перемещается от блока к блоку (из парка приема в сортировочный парк и т.д.), каждый из них можно рассматривать как подпрограмму. В тот момент, когда вагон-транзакт входит в блок, на исполнение вызывается соответствующая подпрограмма, и далее транзакт пытается войти в следующий блок. Такое продвижение вагона-транзакта продолжается до тех пор, пока не произойдет одно из следующих событий:

вагон входит в блок системы, функцией которого является задержка транзакта на некоторое определенное время ($t_{\text{нак}}$ — время нахождения вагона под накоплением на состав для отправления);

вагон входит в блок, функцией которого является удаление транзакта из модели ($t_{\text{отпр}}$ — время на подготовку состава к отправлению, отправление поезда);

вагон «пытается» войти в следующий блок в соответствии с предписанной моделью логикой, однако блок «отказывается» принять этот транзакт (t_3 — время нахождения вагона на пути порта; после выполнения грузовых операций вагон не может быть убран в сортировочный парк из-за занятости локомотива или отсутствия свободных путей). Транзакт остается в текущем блоке и продолжает движение лишь после разрешения войти в следующий блок.

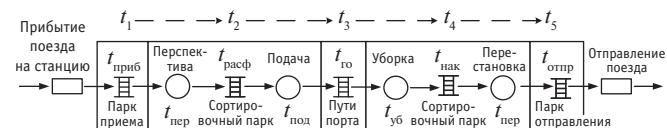


Рис. 1. Функциональная схема работы припортовой станции

Если возникло одно из перечисленных условий и транзакт остается на месте, то начинается перемещение в модели другого транзакта, и, таким образом, выполнение моделирования в системе продолжается. Транзакты поступают в систему, а когда подходит очередь, поступают на обслуживание. После завершения обслуживания транзакт покидает систему.

Вагонопоток, поступающий в систему, проходит определенные процессы t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 . Эти процессы имеют разные временные значения: нахождение состава в парке приема — t_1 , нахождение вагона на путях сортировочного парка — t_2 , грузовые операции с вагонами в порту — t_3 , нахождение вагона под накоплением на новый состав — t_4 , нахождение состава в парке отправления — t_5 .

Логика работы модели основана на перемещении внутри нее динамических элементов — транзактов, которые в зависимости от контекста могут имитировать момент поступления очередного поезда. Смысловая нагрузка транзактов внутри модели выражается типом подвижного состава и родом перевозимого груза, а также состоянием вагона (порожний или груженый). В процессе имитации транзакты создаются, выполняют свои функции и уничтожаются.

Каждый переход транзакта из блока в блок приписывается к определенному моменту модельного времени, за единицу которого принята 1 мин.

Программа позволяет реализовать метод поэлементного моделирования, который заключается в том, что станция разбивается на элементы — приемо-отправочный парк, сортировочный парк и пути на причалах морского порта, а затем с некоторым временным шагом (единицей модельного времени) последовательно рассматриваются состояния объекта (вагона) в моделируемой системе [3].

Имитационная модель функционирует на основе статистических данных о нахождении вагонов с разными грузами на станции и на причалах порта. Статистические данные отражают следующую информацию:

среднесуточное количество прибывающих поездов (максимальное и минимальное);

среднее время нахождения состава в приемо-отправочном парке;

среднее время нахождения вагонов на путях сортировочного парка (по роду перерабатываемого груза);

среднее время нахождения вагона на путях порта и под грузовыми операциями (с учетом специализации причала).

В рассматриваемой модели припортовой станции при формализации приняты следующие допущения:

объем перерабатываемого грузопотока моделируется с учетом среднего времени нахождения вагона с определенным грузом на всех элементах схемы станции;

в модели не учтено прибытие и отправление судов, а также емкости складских терминалов;

в модели предполагается, что прибывающий вагонопоток (экспорт) равен отправляемому вагонопотоку (импорт), т.е. количество вагонов в прибывающих и отправляемых поездах равно.

Исследование, выполненное в Дальневосточном государственном университете путей сообщения, позволило установить, что существует зависимость между рабочим парком припортовой станции и объемом переработки грузов в морском порту Владивостока. При определенной величине рабочего парка объем переработки грузов в порту стабилизируется, после чего начинает снижаться. Это связано с заполнением путей станции вагонами, что ограничивает ее возможности с точки зрения формирования подач на грузовые фронты порта, а также своевременной уборки обработанных вагонов. Для определения максимального вагонопотока, который может быть переработан на припортовой станции, разработан программный комплекс.

Транспортный процесс характеризуется рядом случайных величин, имитация которых позволяет приблизить моделируемый процесс к реальному и изучить влияние отдельных случайных параметров на процесс функционирования всей системы. После анализа показателей работы станции Владивосток были определены вероятностные параметры входных данных имитационной модели:

количество поездов и вагонов, поступающих на станцию в течение суток;

количество перегружаемого груза;

среднее время переработки вагона с определенным родом груза.

Так как эти данные случайны, их можно представить в виде гистограмм. Рассмотрим гистограммы наиболее перерабатываемых вагонопотоков на станции Владивосток (рис. 2–4). На основании гистограмм определяются средние значения вводимых в систему параметров.

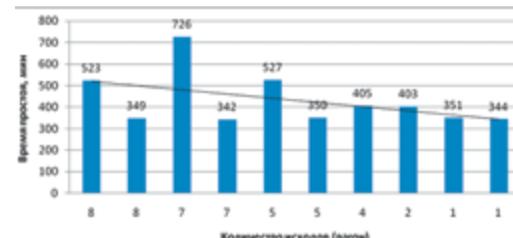


Рис. 2. Гистограмма нахождения вагонов с грузом (дизельным топливом) на причалах порта, мин

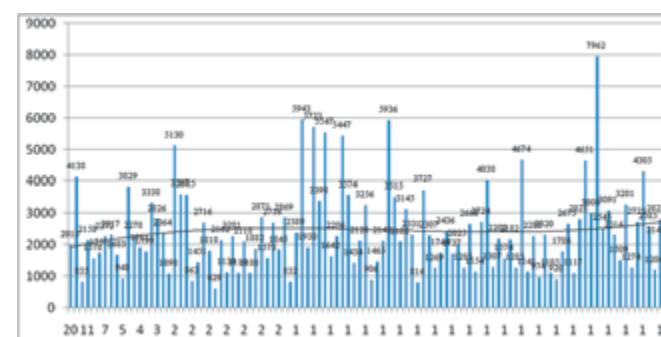


Рис. 3. Гистограмма нахождения вагонов с контейнерами на причалах порта, мин

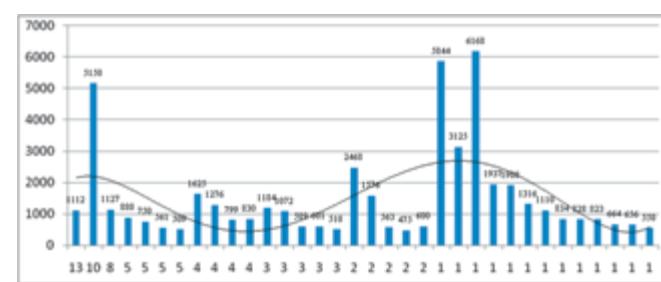


Рис. 4. Гистограмма нахождения вагонов с грузом (коксом) на причалах порта, мин

Поступление поездов в основном носит детерминированный характер, так как подчиняется графику движения. Наилучшие показатели работы припортовой станции получаются при равномерном прибытии и отправлении поездов, но часто возникают ситуации, когда между прибытием поездов существует небольшой интервал, тогда станция работает в напряженном режиме. Задача модели — показать работу станции в различных вариациях поступления вагонопотока (от минимального до максимального) с разными грузами.

Результаты имитационного моделирования являются продуктом обработки данных, наблюдаемых и фиксируемых в процессе работы моделирующей программы на компьютере. Показатели,

фиксируемые на выходе модели, измеряются с помощью соответствующих физических величин. К таким показателям можно отнести объем переработанного груза, моменты времени начала и окончания операций, загрузку путей станции и порта, количество переработанных вагонов и т.д. [4].

По завершении имитационного эксперимента оценивается адекватность имитационной модели реальной системе. Упрощенная модель не может быть подобна объекту, и, согласно теории подобия, требование пропорциональности сходных параметров и процессов в модели и объекте заведомо не соблюдается из-за различия в числе параметров. Поэтому полученные результаты моделирования будут приблизительными и будут отражать лишь основные характеристики системы [5].

Уникальность разработанной модели заключается в том, что она позволяет смоделировать работу припортовой станции в реальных условиях, учесть все временные характеристики нахождения вагонов в системе «станция — порт», технологические времена и сверхнормативный простой вагонов.

Программа позволяет самостоятельно задавать следующие параметры:

- количество прибывающих поездов;
- количество вагонов в составе поезда;
- количество вагонов с определенным родом груза в составе поезда;
- тоннаж каждого вагона;
- время прибытия поезда.

В модели введен счетчик времени прибытия и обработки вагонов в системе «станция — порт».

Разработанный программный комплекс включает следующие вкладки: «Настройка входящего потока» (рис. 5), «Моделирование» (рис. 6), «Загрузка пути» (рис. 7), «Использование каждого пути» (рис. 8).

При поступлении поездов в систему происходит их обработка, простой в сортировочном парке и подача на причалы порта. Вагоны с определенным грузом подаются строго на конкретный причал, где выполняются грузовые операции с подвижным составом. Если грузовой фронт по переработке определенного груза занят вагонами, то остальные вагоны находятся в ожидании в сортировочном парке станции. После выполнения грузовых операций вагоны поступают на пути сортировочного парка под накопление на состав для отправления. При обеспечении полносоставности поезд проходит операции по отправлению и отправление, далее он исключается из модели, освобождая пути станции.

Сбор статистических данных происходит по окончании всех перемещений вагонов на основе свойств объектов моделирования (вместимость сортировочных путей, грузового фронта, длина очереди на обработку вагона на причале). Информацию можно получить отдельно по каждому причалу, по роду переработанного грузопотока, а также в целом по станции.

Имитация работы припортовой станции не ограничивается одними сутками: пока вагоны есть в системе, программа работает. Количество вагонов в модели ограничивается вместимостью путей сортировочного парка станции.

Работа имитационной модели основывается на структуре железнодорожной станции и морского порта.

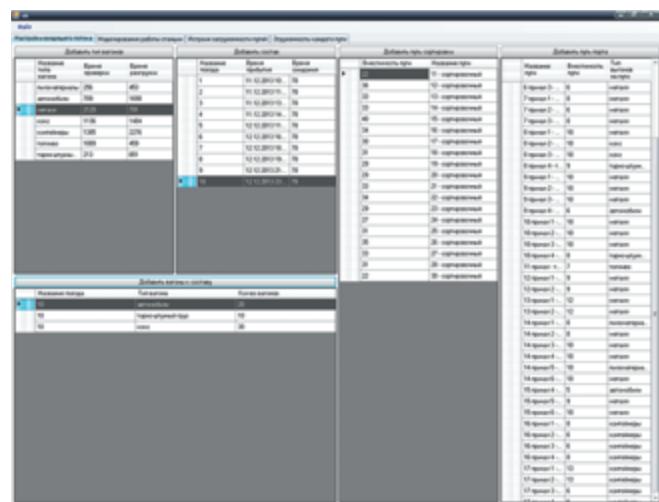


Рис. 5. Вкладка «Настройка входящего потока»



Рис. 6. Вкладка «Моделирование»

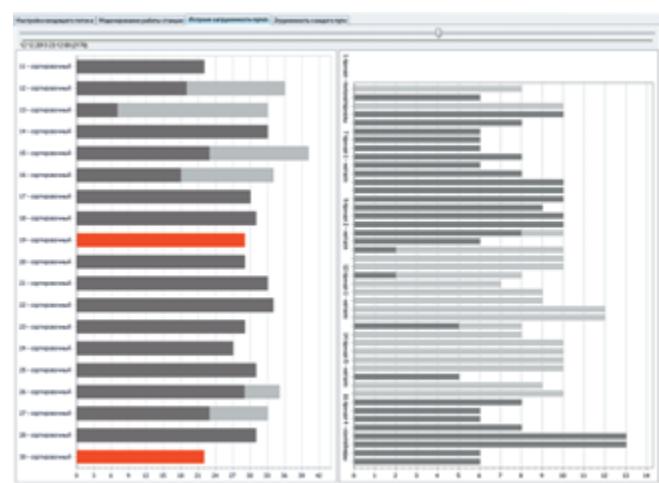


Рис. 7. Вкладка «Загрузка пути»



Рис. 8. Вкладка «Использование каждого пути»

Определение оптимального транспортного потока для припортовой железнодорожной станции позволит эффективно использовать ее ресурсы и обеспечить переработку грузовых потоков максимального объема. Если поступающий на станцию поток слишком большой и нагрузка устройств несбалансирована, то станция будет работать в режиме перегрузок, с задержками и экономическими потерями. Если нагрузка недостаточна, то затраты на обслуживание этого потока будут превышать доходы от грузоперевозок. Поэтому установление соответствия между мощностью устройств станции и величиной имеющихся или спрогнозированных грузовых потоков является условием эффективного функционирования системы «железнодорожная станция — морской порт». Разработанная модель может быть использована для рационализации работы существующих транспортных узлов.

Литература

1. Новиков П. А. Рациональное взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в припортовых транспортных узлах // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 72–75. ISSN 1815-9400.
2. Король Р. Г. Обоснование математического аппарата для моделирования работы железнодорожной станции во взаимодействии с портом // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в 21 веке : труды всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. А. Ф. Серенко. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. Т. 2. С. 161–170.
3. Козлов П. А., Пермикин В. Ю., Колокольников В. С. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 3–6. ISSN 1815-9400.
4. Максимей И. В., Сукач Е. И., Гириц П. В. Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона // DataRecording, Storage&Processing. 2008. V. 10. No 1. P. 49–58.
5. Новиков П. А. Имитационный метод динамического согласования (И-МДС) как аппарат оптимизации сложных технологических процессов на транспорте // Транспорт Урала. 2008. № 3 (18). С. 10–12. ISSN 1815-9400.

References

1. Novikov P. A. Ratsionalnoe vzaimodeystvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v priportovykh transportnykh uzlakh [Rational interaction between rail and sea transport in portside transport hubs] // Transport of the Urals. 2008. № 2 (17). S. 72–75. ISSN 1815-9400.
2. Korol R. G. Obosnovanie matematicheskogo appara dlya modelirovaniya raboty zheleznodorozhnoy stantsii vo vzaimodeystvii s portom [Justification of mathematical framework for simulating the operation of the railway station in conjunction with the port] // Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v 21 veke : trudy vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem / Pod red. A. F. Serenko. Khabarovsk : Izd-vo DVGUUPS, 2013. T. 2. S. 161–170.
3. Kozlov P. A., Perminkin V. Yu., Kolokolnikov V. S. Avtomatizirovannoe postroenie imitatsionnykh modeley krupnykh transportnykh obyektov [Automated development of simulation models of major transport facilities] // Transport of the Urals. 2013. № 2 (37). S. 3–6. ISSN 1815-9400.
4. Maksimey I. V., Sukach Ye. I., Giruts P. V. Ispolzovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya nakhodcheniya integralnogo maksimalnogo potoka v transportnoi seti regiona [Application of simulation to find the integral maximum flow in the transport network of the region] // DataRecording, Storage&Processing. 2008. V. 10. No 1. P. 49–58.
5. Novikov P. A. Imitatsionny metod dinamicheskogo soglasovaniya (I-MDS) kak apparat optimizatsii slozhnykh tekhnologicheskikh protsessov na transporte [Simulation method of dynamic coordination (I-MDS) as a tool to optimize complex processes in transport] // Transport of the Urals. 2008. № 3 (18). S. 10–12. ISSN 1815-9400.

УДК 681.518.5+656.25

Дмитрий Викторович Ефанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), инженер ЗАО «МГП «ИМСАТ», Санкт-Петербург

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА

Dmitriy Viktorovich Efanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Automatics and Telemechanics, Petersburg State Transport University (PSTU), engineer, CJSC «MGP IMSAT», St. Petersburg

Method for automated verification of operation logic of tested units in telemechanics and monitoring systems

Аннотация

Развитие систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики связано с совершенствованием самой технологии мониторинга. Сегодня многие задачи, выполняемые человеком, автоматизируются и решаются с помощью техники, в том числе процесс анализа диагностической информации. С целью совершенствования системы мониторинга в статье предлагается метод автоматизации проверки логики функционирования средств автоматики в режиме реального времени.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, системы технического диагностирования и мониторинга, аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля, диагностическая информация, автоматизация анализа данных.

Summary

Development of technical diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics devices is connected with the improvement of the monitoring technology. Today, many of the tasks performed by the human are being automated and solved by machines, including the process of analyzing diagnostic information. In order to improve monitoring system, the paper proposes the method for real-time automated verification of operation logic of automation equipment.

Keywords: railway automation and telemechanics, technical diagnosis and monitoring systems, centralized control hardware and software package, diagnostic information, automation of data analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) связано с совершенствованием подходов к обеспечению надежности и безопасности их функционирования. С этой целью внедряются новые методы технического обслуживания и ремонта устройств [1], модернизируется элементная база СЖАТ [2], вводятся современные средства встроенного и надстраиваемого мониторинга технического состояния объектов, реализующих перевозочный процесс [3]. Каждому из способов повышения надежности и безопасности СЖАТ в равной мере уделяется внимание разработчиков многих проектных институтов.

Наряду с микроэлектронной и микропроцессорной техникой совершенствуется и область автоматизации процессов управления и контроля качества функционирования средств СЖАТ. Современные СЖАТ снабжаются развитым диагностическим обеспечением. Это позволяет определять техническое состояние устройств, отвечающих за качество перевозочного процесса, в непрерывном режиме, а также прогнозировать дальнейшие изменения контролируемых параметров — вплоть до фиксации предотказных состояний [4].

Устройства управления на одной станции могут иметь различную элементную базу (релейную или бесконтактную), она может содержать средства встроенного диагностирования, а может поставляться без таковых. Системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ), внедряемые на железных дорогах России, позволяют подключаться к любым объектам СЖАТ и осуществлять комплексный мониторинг ответственных параметров. При этом с каждым годом совершенствуются и технологии мониторинга СЖАТ: от систем, осуществляющих только съем дискретных и аналоговых данных, без автоматизации анализа диагностических ситуаций, с большим количеством ложно выявляемых событий дефектов, к высоконтеллектуальным системам, имеющим более высокую степень достоверности мониторинга и способным автоматически анализировать многие измеряемые параметры. Одним из достижений последних лет

является создание подсистем поддержки принятия решений в автоматизированных рабочих местах (APMax) СТДМ.

По описанному выше пути идут и разработчики системы Аппаратно-программного комплекса диспетчерского контроля (АПК-ДК) фирмы ЗАО «МГП «ИМСАТ» [5]. В настоящее время осуществляется переход от использования операционной системы реального времени QNX4 к системе QNX6, позволяющей устранить ряд недостатков предыдущей версии системы АПК-ДК, к которым прежде всего следует отнести невозможность восстановления потерянной диагностической информации из-за нестабильной работы каналов связи, а также невозможность хранения больших объемов информации [6]. Совершенствуя систему мониторинга средствами АПК-ДК, развивают и технологию обработки диагностической информации. Первым шагом в решении проблемы автоматизации анализа диагностических событий является внедрение алгоритмизации процесса проверки штатного функционирования объектов СЖАТ. Другими словами, важным этапом в развитии АПК-ДК является внедрение в работу АРМов алгоритмов нормальной работы устройств автоматики. Такие алгоритмы способны проверять логику функционирования устройств автоматики при различных поездных ситуациях в режиме реального времени и сигнализировать о возникающих нарушениях. Алгоритмы нормальной работы вносятся в программное обеспечение АПК-ДК с помощью специализированного модуля в редакторе проектировщика.

1. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Система АПК-ДК получает данные от специализированных измерительных контроллеров и от сопряженных с ними микропроцессорных систем. Эти данные в общем случае представляются набором дискретной и аналоговой диагностической информации. Задача системы АПК-ДК не ограничивается сбором этой информации, важно ее обработать и вывести в удобном для просмотра и дальнейшего анализа виде на АРМ технолога АПК-ДК. С этой целью вся диагностическая информация в базе данных АПК-ДК систематизируется по функциональным элементам СЖАТ, где каждому элементу поставлен в соответствие некоторый набор дискретных и аналоговых параметров. Таким образом, все множество диагностических данных разбивается на некоторое количество подмножеств по элементам СЖАТ и по виду информации (аналоговая или дискретная). Для удобства пользователя дискретную диагностическую информацию в АПК-ДК выводят в технологическом окне АРМа в графическом виде с использованием принятых условных обозначений [7]. В таком окне изображается схематический план станции, где выведены индикаторы технического состояния устройств автоматики (стрелок, светофоров, рельсовых цепей, устройств энергоснабжения и т.д.). На рис. 1 для примера изображено окно АРМа технолога АПК-ДК.

Вся аналоговая информация выводится в виде списков измерений при двойном щелчке по объектам контроля в технологическом окне со схематическим планом станции (рис. 2) либо в специальном технологическом окне измерений (на рис. 1 в меню АРМа сверху это пятая вкладка с надписью «Измерения»).

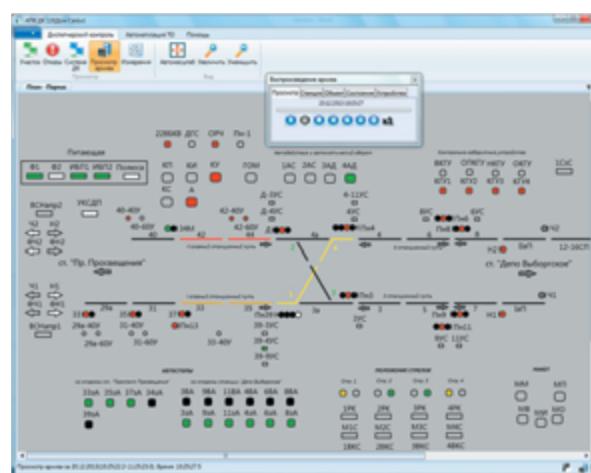


Рис. 1. Окно АРМа технолога АПК-ДК

Многие параметры анализируются в АПК-ДК автоматически. Например, если для устройства существуют граничные значения работоспособности по какому-либо параметру, система сама сравнивает измеренные значения с граничными, записанными в базе данных, и в случае достижения граничных значений или их превышения/занизжения выводит информацию о наличии дефекта. Событие дефекта индицируется в АРМе. Для многих объектов, имеющих расширенный набор аналоговых измерений (например, стрелок с пятипроводной схемой управления [8] и тональных рельсовых цепей [9]) производится автоматический поиск предотказных состояний [4]. Переходы устройств СЖАТ в эти состояния также индицируются в окне АРМа.

Стрелочная секция 4		
Параметры	Нормы	Ошибки
Сопротивление изоляции кабеля	54.503	МОн
Из среднее действующее напряжение между фазами А и В в режиме измерения рабочей цепи	229	В
Из средний за переход ток в фазе А	2	А
Из среднее действующее напряжение между фазами В и С в режиме измерения рабочей цепи	227	В
Из среднее действующее напряжение между фазами С и А в режиме измерения рабочей цепи	228	В
Из средний за переход ток в фазе В	2	А
Из средний за переход ток в фазе С	2	А
Средняя активная мощность при переводе стрелки	342	Вт
Потребленная энергия	946	Дж
Уолин перевода	3897	кН
Ток в цепи реле ГК	0.002	мА
Ток в цепи МК	0	мА

Рис. 2. Окно вывода аналоговой информации

Как следует из приведенных выше примеров, в системе АПК-ДК заложен принцип логической обработки диагностической информации. Все состояния устройств СЖАТ классифицируются на диагностические события — отказы, предотказные состояния и штатные ситуации нормальной работы устройств.

В настоящее время программное обеспечение АПК-ДК совершенствуется, и в него закладывается принцип отслеживания процесса нормального функционирования устройств автоматики,

также основанный на логической обработке диагностических данных. Это позволяет индицировать в АРМе технолога АПК-ДК наличие отклонений от норм в работе средств СЖАТ, что, в свою очередь, дает возможность обслуживающему персоналу проанализировать сложившуюся диагностическую ситуацию и выработать стратегию по восстановлению технического объекта.

Для проектировщика АПК-ДК создан специальный редактор ввода алгоритмов нормальной работы, интегрированный в комплекс по проектированию системы мониторинга (рис. 3).

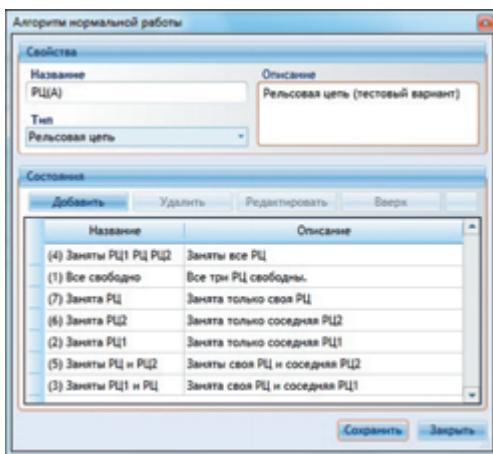


Рис. 3. Окно ввода алгоритмов нормальной работы

Сегодня редактор представляет собой достаточно сложное приложение, где диагностические ситуации вносятся трудоемко, а процесс отладки алгоритмов не нагляден и крайне затруднен из-за невозможности просмотра состояний алгоритма. По сути, каждый алгоритм — это конечный автомат, и, как известно, удобной формой его задания является графическая форма. Другими словами, алгоритм может быть задан как граф переходов с некоторым множеством узлов, соответствующих состояниям алгоритма, и дуг, соответствующих переходам между заданными состояниями.

В настоящее время для удобства проектировщика редактор модернизируется до редактора ввода конечных автоматов, описывающих нормальную работу устройств автоматики. Модернизация позволит усовершенствовать ввод алгоритмов до такого уровня, что сами пользователи смогут корректировать и создавать алгоритмы с учетом особенностей действующих на объекте мониторинга СЖАТ. Конечно, такая возможность ограничивается правами доступа к проекту АПК-ДК и должна контролироваться разработчиком.

2. РЕДАКТОР ВВОДА АЛГОРИТМОВ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ

Редактор создается из следующих соображений, учитывающих особенности диагностической информации.

Пусть на объекте мониторинга используется множество E_k элементов, характеризующих объекты СЖАТ, и каждый элемент этого множества обозначен как $E_{k,i}$, где i — номер элемента. Каждый элемент может находиться во множестве $\Sigma_{k,i}$ допустимых состояний. При этом каждое состояние характеризуется множеством $\Pi_{k,i}$ параметров элементов

$$\Pi_{k,i} = \{\Pi_{k,i}^{\delta}; \Pi_{k,i}^{\alpha}; \Pi_{k,i}^{\sigma}\}, \quad (1)$$

где $\Pi_{k,i}^{\delta}$ — множество дискретных параметров i -го элемента;

$\Pi_{k,i}^{\alpha}$ — множество аналоговых параметров i -го элемента;

$\Pi_{k,i}^{\sigma}$ — множество параметров самодиагностирования i -го элемента.

Множество состояний i -го элемента включает в себя j элементов: $\Sigma_{k,i} = \{\Sigma_{k,i}^j\}$, а само множество элементов, в свою очередь, состоит из k элементов: $E_k = \{E_{k,i}\}$.

Каждый элемент в базе данных АПК-ДК описывается множеством параметров и состояний:

$$M_{k,i} = \Pi_{k,i} \cup \Sigma_{k,i} = \{\Sigma_{k,i}^j\} \cup \{\Pi_{k,i}^{\delta}; \Pi_{k,i}^{\alpha}; \Pi_{k,i}^{\sigma}\}. \quad (2)$$

При создании алгоритма анализа нормальной работы устройств СЖАТ необходимо сгруппировать элементы при совместном их функционировании в узлы графа конечного автомата. Каждый узел при этом будет содержать некоторое количество элементов

$$N_x^t = \bigcup_{i \in D} M_{k,i}, \quad (3)$$

где D — множество, характеризующее необходимый набор элементов конкретного узла для реализации заданного алгоритма.

Набор всех узлов, получаемых при полном переборе всех допустимых состояний и параметров объектов (для параметров целесообразно вводить пороговые значения), является полным набором и будет характеризовать верхнюю границу мощности множества допустимых узлов. На практике полный перебор производить не нужно и нецелесообразно, так как некоторые узлы будут описывать «лишние», никогда не возникающие диагностические события. Из множества узлов выбираются только те, которые описывают реальные диагностические события,

$$N_x = \bigcup_{t \in R} N_x^t, \quad (4)$$

где R — множество узлов, содержащих реальные диагностические события.

Узлы множества N_x соединяются дугами в необходимой последовательности, каждой дуге соответствует определенное условие перехода из узла t_i в узел t_j , т.е. m_{t_i, t_j} (рис. 4).

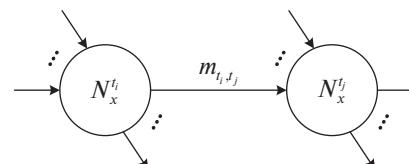


Рис. 4. Соединение узлов в графе

При вводе алгоритма проектировщику дается функциональная база, содержащая два элемента — узел и дугу. Проектировщик выбирает в базе элемент «узел» и вносит в поле редактора алгоритмов нормальной работы. При щелчке правой кнопкой мыши по узлу всплывает окно ввода элементов СЖАТ, и проектировщик добавляет все необходимые для процесса анализа

той или иной диагностической ситуации элементы. Для каждого узла, таким образом, предусмотрена:

возможность добавления необходимых для работы алгоритма элементов СЖАТ согласно выражению (3);

возможность установки состояний и параметров элементов ЖАТ, соответствующих некоторому диагностическому событию.

Редактор запоминает все начальные условия, после чего проектировщик добавляет необходимое ему количество узлов [выражение (4)]. Всем узлам автоматически присваиваются внесенные в начальный узел элементы СЖАТ — это сокращает время на проектирование алгоритма. После создания всех диагностических состояний в алгоритме проектировщик выбирает элемент «дуга» и соединяет между собой те состояния конечного автомата, в которые допустимы переходы. Тем самым создается последовательность переходов между состояниями конечного автомата.

Для учета особенностей аппаратного обеспечения АПК-ДК (измерительные контроллеры могут передавать диагностические данные с задержкой и с разным периодом опроса) предусмотрена возможность задания временных параметров для синхронизации сигналов телеконтроля и телемеханики:

- время задержки сигналов телеконтроля и телемеханики;
- время перехода;
- время нахождения в узле.

Ввод данных для работы алгоритма может быть осуществлен следующим образом. На изображенный типовой элемент (узел или дугу) наводится курсор мыши, затем двойным щелчком по объекту открывается меню ввода диагностического события и временных параметров (рис. 5). Для узла это меню может быть совмещено, тогда как для дуги достаточно выводить только меню временных параметров, так как условия перехода будут задаваться конечным узлом (узлом, куда направлена дуга).



Рис. 5. Меню ввода параметров конечного автомата

Таким образом, работа проектировщика сводится к последовательности таких действий:

1. Постановка задачи анализа диагностических событий.

2. Выбор элементов ЖАТ, участвующих в алгоритме.

3. Ввод алгоритма.

3.1. Ввод начального узла и набора элементов ЖАТ, входящего в него.

3.2. Присвоение состояний и параметров элементам начального узла.

3.3. Ввод необходимого количества узлов и присвоение им состояний и параметров.

3.4. Соединение различных узлов дугами.

3.5. Введение временных параметров алгоритма.

4. Отладка алгоритма на архивном периоде диагностических данных.

5. Выбор объектов, к которым автоматически будет применяться тот или иной алгоритм.

При тестировании и отладке созданных алгоритмов проектировщику предоставляется возможность просмотра нахождения конечного автомата в текущей диагностической ситуации как на архивном периоде времени, так и в реальном времени. Это упрощает поиск алгоритмических и системных ошибок программного обеспечения (неверная постановка задачи, неверный учет времени срабатывания контроллеров АПК-ДК и пр.).

Следует отметить, что создание алгоритма не требуется для каждого диагностируемого объекта — система АПК-ДК сама на программном уровне автоматически применяет созданные алгоритмы к однотипным объектам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен способ удобного ввода алгоритмов анализа нормальной работы устройств СЖАТ, основанный на графической форме представления данных. Это упрощает задачу проектировщика при создании программного обеспечения АПК-ДК и, что немаловажно, сокращает время на тестирование созданных алгоритмов за счет наглядности представления данных. дальнейшим развитием системы мониторинга является внедрение возможности логического анализа для выявления предотказных состояний и прогнозирования дальнейшего срока службы до отказа, для чего используются современные методы обработки информации, а также зарубежный опыт в практической диагностике на железнодорожном транспорте [10, 11].

Внедрение в работу диагностического комплекса АПК-ДК алгоритмизации отслеживания нормального функционирования устройств СЖАТ позволяет расширить функциональные возможности системы мониторинга. При этом упрощается задача технолога (или диспетчера) дистанции сигнализации, централизации и блокировки по анализу качества работы устройств автоматики.

Литература

1. Вотолевский А. Л. АСУ и технологии обслуживания устройств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 10. С. 36–42. ISSN 0005-2329.
2. Никитин А. Б., Бушуев С. В. Тенденции развития электрической централизации и компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях // Транспорт Урала. 2006. № 2 (9). С. 14–18. ISSN 1815-9400.
3. Ефанов Д. В., Лыков А. А. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие. СПб. : ПГУПС, 2012. 59 с.
4. Сапожников Вл. В., Лыков А. А., Ефанов Д. В. Понятие предотказного состояния // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 12. С. 6–8. ISSN 0005-2329.
5. ЗАО «МГП «ИМСАТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.realsys.ru/> (дата обращения: 28.02.2014).
6. Ефанов Д. В. Техническое диагностирование и мониторинг устройств автоматики в метрополитенах // Автоматизация в промышленности. 2014. № 3. С. 4–8. ISSN 1819-5962.
7. СТО РЖД 1.19.005-2008. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Условные графические обозначения / введ. 30.12.08. М. : ПКТБ ЦШ ОАО «РЖД», 2008. 32 с.
8. Автоматизированный контроль усилия перевода стрелки / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, Д. В. Ефанов и др. // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 7. С. 2–4. ISSN 0005-2329.
9. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 36–42. ISSN 1815-9400.
10. Böhm T. Accuracy Improvement of Condition Diagnosis of Railway Switches via External Data Integration // Proc. of 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. Poster 16. 9 p.
11. A Simple State-Bases Prognostic Model for Railway Turnout Systems / O. F. Eker, F. Camci, A. Guclu, et al // Proc. of IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 58. Issue 5. P. 1718–1726.

References

1. Votolevsky A. L. ASU i tekhnologii obsluzhivaniya ustroystv ZhAT [ACS and RAT equipment maintenance technologies] // Avtomatika, svyaz, informatica. 2011. № 10. S. 36–42. ISSN 0005-2329.
2. Nikitin A. B., Bushuev S. V. Tendentsii razvitiya elektricheskoy tsentralizatsii i kompyuternykh sistem operativnogo upravleniya dvizheniem poezdov na stantsiyakh [Development trends of electric centralization and computer systems for operational traffic management on stations] // Transport of the Urals. 2006. № 2 (9). S. 14–18. ISSN 1815-9400.
3. Efanov D. V., Lykov A. A. Osnovy postroeniya i printsipy funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringu ustroystv zheleznyodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki : ucheb. posobie [Framework and operational principles of technical diagnostics and monitoring systems for railway automation and telemechanics devices : a textbook]. SPb. : PGUPS, 2012. 59 s.
4. Sapozhnikov Vl. V., Lykov A. A., Efanov D. V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [A concept of pre-failure state] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 12. S. 6–8. ISSN 0005-2329.
5. ZAO «MGP» «IMSAT» [Electronic resource]. URL: <http://www.realsys.ru/> (date accessed: 28.02.2014).
6. Efanov D. V. Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring ustroystv avtomatiki v metropolitenakh [Technical diagnostics and monitoring of automation devices in subways] // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2014. № 3. S. 4–8. ISSN 1819-5962.
7. STO RZhD 1.19.005-2008. Sistemy i ustroystva zheleznyodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Uslovnye graficheskie oboznacheniya [Organizational Standard of Russian Railways 1.19.005-2008. Railway automation and telemechanics systems and devices. Conditional graphical notations] / vved. 30.12.08. M. : PKTB TsSh OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi», 2008. 32 s.
8. Avtomatizirovanny kontrol usiliya perevoda strelki [Automated control of point setting force] / V. M. Chukhonin, B. L. Gorbunov, D. V. Efanov i dr. // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 7. S. 2–4. ISSN 0005-2329.
9. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Monitoring parametrov relsovykh tsepey tonalnoy chastoty [Monitoring of sonic frequency track circuits parameters] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). S. 36–42. ISSN 1815-9400.
10. Böhm T. Accuracy Improvement of Condition Diagnosis of Railway Switches via External Data Integration // Proc. of 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. Poster 16. 9 p.
11. A Simple State-Bases Prognostic Model for Railway Turnout Systems / O. F. Eker, F. Camci, A. Guclu, et al // Proc. of IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 58. Issue 5. P. 1718–1726.

УДК 656.25:656.251/256

Ольга Николаевна Пащенко, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Николай Константинович Велигжанин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА СВЯЗИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЦЕПЯМ

Olga Nikolaevna Pashchenko, Senior Lecturer, Department of Railway Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Nikolay Konstantinovich Veligzhanin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Extending the range and quality of communication via electric circuits

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы увеличения дальности связи по электрическим кабелям путем включения корректирующих элементов, компенсирующих сопротивления проводов и проводимость изоляции.

Приведены схемы корректоров с расчетом их элементов, а также частотные характеристики скорректированных линий.

Ключевые слова: дальность связи, пассивная коррекция, активная коррекция, электрический кабель, преобразователь импеданса, преобразователь проводимости, двусторонний линейный усилитель.

Summary

The paper deals with increasing the distance of communication via electric cables by including the correcting elements that compensate for circuit resistance and insulation conductivity.

The schemes of correcting elements are provided, including design of their elements, as well as the frequency response of the adjusted lines.

Keywords: communication range, passive correction, active correction, power supply cable, impedance transducer, conductivity transmitter, two-sided linear amplifier.

Cовременное развитие средств связи базируется на цифровых технологиях, использующих волоконно-оптические и спутниковые системы передачи. В то же время в эксплуатации находится большое количество оборудования, работающего по электрическим цепям кабельных линий, которое является основным средством связи на малодеятельных участках железной дороги и на сетях доступа малых и средних станций.

Известно, что в процессе эксплуатации кабелей их качественные показатели ухудшаются, увеличивается затухание, взаимное влияние, искажение сигнала, снижается защищенность.

В данной статье предлагается компенсировать затухание и искажение цепей кабельных линий путем уравновешивания их реактансов реактансами противоположного знака корректирующих четырехполюсников при пассивной коррекции и компенсации сопротивления проводов с проводимостью изоляции активной коррекцией отрицательными сопротивлениями.

Для реализации линейного корректора выбрана наиболее экономичная Т-образная схема. Корректируемая линия с включенными корректорами представляет собой цепочечно соединенных одинаковых полузвеньев (рис. 1), для которой могут быть составлены уравнения [1]:

$$\begin{aligned} U_H &= AU_K + BI_K; \\ I_H &= CU_K + DI_K. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A &= ch(\gamma l_s) + \frac{Z_1}{2Z_C} sh(\gamma l_s); \\ B &= Z_C \left[sh(\gamma l_s) + \frac{Z_1}{2Z_C} ch(\gamma l_s) \right]; \\ C &= \frac{1}{2Z_2} ch(\gamma l_s) + \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2} \right) \frac{1}{Z_C} sh(\gamma l_s); \\ D &= \frac{Z_C}{2Z_2} sh(\gamma l_s) + \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2} \right) ch(\gamma l_s). \end{aligned} \quad (2)$$

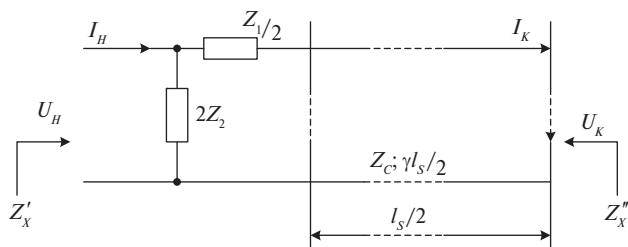


Рис. 1. Полузвено цепи с периодически повторяющимся корректирующим четырехполюсником

Постоянная передачи полузвена:

$$g = \alpha + j\beta = 20 \lg(\sqrt{AD} + \sqrt{BC}). \quad (3)$$

Характеристическое сопротивление со стороны корректора:

$$Z'_X = \sqrt{\frac{AB}{CD}}. \quad (4)$$

Со стороны линии:

$$Z''_X = \sqrt{\frac{BD}{AC}}. \quad (5)$$

Затухание цепи, составленной из полузвеньев (см. рис. 1), будет минимальным, когда сопротивления Z'_X и Z''_X будут комплексно сопряженными.

Для электрически длинных линий уравнение $Z'_X = Z''_X^*$ упрощается.

Для последовательной коррекции:

$$Z'_X = Z_C + \frac{Z_1}{2}, \quad (6)$$

$$Z''_X = Z_C. \quad (7)$$

Для параллельной коррекции:

$$Z'_X = \frac{Z_C \cdot Z_2}{Z_C + Z_2}, \quad (8)$$

$$Z''_X = Z_C. \quad (9)$$

Решая уравнения (6)–(9) относительно Z_1 и Z_2 , получим:

$$Z_1 = 2jX_C, \quad (10)$$

$$Z_2 = j \frac{R_C^2 + X_C^2}{2X_C}, \quad (11)$$

где R_C и X_C — активная и реактивная составляющие волнового сопротивления цепи соответственно.

Приведенные расчеты и экспериментальные испытания показали низкую эффективность пассивной коррекции. На рис. 2 показаны частотные зависимости километрического затухания

скорректированного кабеля, из которых видно, что параллельная и смешанная коррекции сопровождаются еще и значительными искажениями.

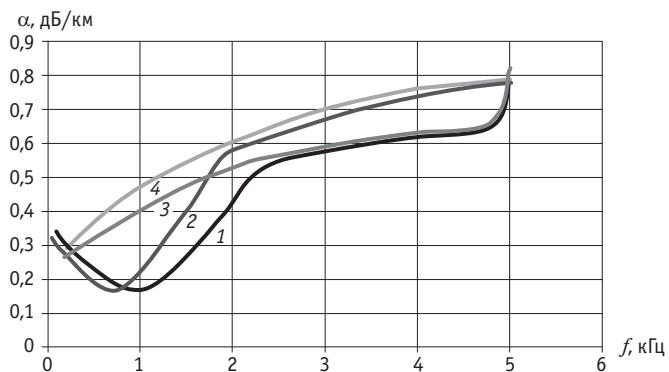


Рис. 2. АЧХ кабеля МКСА 4×4×1,2; $I_s = 10$ км:

1 — параллельная коррекция; 2 — смешанная; 3 — последовательная; 4 — без коррекции

Уменьшение затухания и одновременное выравнивание амплитудно-частотной характеристики цепи кабельной линии наиболее эффективно можно достичь компенсацией активного сопротивления проводов и проводимости изоляции.

Известно [2], что в области частот до 5 кГц 80% всех потерь составляют потери на нагрев проводов. С увеличением частоты доли потерь в проводах и в изоляции выравниваются. Следовательно, на низких частотах эффективность будет наибольшей при последовательной коррекции, а на средних и высоких частотах — при смешанной.

Реализация активной коррекции может быть осуществлена с помощью включения в цепь отрицательных сопротивлений.

Отрицательные сопротивления могут быть получены двумя способами:

изменением полярности напряжения (*S*-типа)

$$-R = \frac{(-U)}{I} \text{ (U-ПИ),}$$

изменением направления тока (*N*-типа)

$$-R = \frac{U}{(-I)} \text{ (I-ПИ).}$$

Для компенсации затухания, обусловленного сопротивлением проводов, следует использовать отрицательные сопротивления *N*-типа, управляемые током, а для компенсации затухания, обусловленного проводимостью изоляции, следует использовать отрицательное сопротивление *S*-типа, управляемое напряжением.

Одной из основных характеристик элемента с отрицательным сопротивлением является устойчивость. Система считается устойчивой, если на кратковременное внешнее воздействие $e(t)$ (входной сигнал) она отвечает затухающими процессами $a(t)$ (выходной сигнал). Система неустойчива, когда возмущения вызывают процессы, возрастающие во времени.

Отрицательное сопротивление *N*-типа устойчиво, когда сопротивление потерь источника тока R_Γ больше этого сопротивления:

$$R_\Gamma > R. \quad (12)$$

Отрицательное сопротивление *S*-типа устойчиво, когда сопротивление нагрузки

$$R_\Gamma < R. \quad (13)$$

Таким образом, сопротивление нагрузки для отрицательного сопротивления *N*-типа может принимать значения вплоть до режима холостого хода, а для сопротивления *S*-типа, наоборот, — до режима короткого замыкания [3].

Устройства с отрицательными сопротивлениями могут быть реализованы при помощи усилителей с обратной связью. В зависимости от вида обратной связи схемы преобразователей импедансов (ПИ) делятся на две группы: ПИ с усилителями с пассивной обратной связью и ПИ с усилителями с активной обратной связью. В том и другом случае они могут служить двум принципиально различным цепям: для создания отрицательных импедансов (в качестве двухполюсников) и для получения заданных передаточных функций (в качестве четырехполюсников).

Важными характеристиками ПИ являются область линейной характеристики управления по току и напряжению и оптимальное сопротивление нагрузки.

Реализация отрицательных сопротивлений с широкой линейной характеристикой может быть выполнена с помощью комбинаций четырехполюсников, один из которых должен иметь активные усиительные элементы, а второй, пассивный, играет роль цепи обратной связи. Возможны следующие схемы их взаимного соединения:

- параллельно-параллельная;
- последовательно-последовательная;
- параллельно-последовательная;
- последовательно-параллельная.

Последовательно-параллельная схема активного (H) и пассивного (h) четырехполюсника представлена на рис. 3.

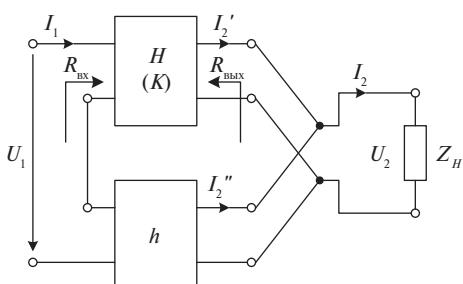


Рис. 3. Последовательно-параллельная схема соединения активного (H) и пассивного (h) четырехполюсников

Каждый из четырехполюсников, представленных на рис. 3, описывается соответствующими матрицами H ; h . Входные сопротивления общей схемы являются функцией элементов обеих матриц. Активный четырехполюсник, представляющий усилитель без обратной связи, описывается матрицей

$$H = \begin{vmatrix} R_{\text{вх}} & 0 \\ K & \frac{1}{R_{\text{вых}}} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Пассивный четырехполюсник (h) описывается матрицей

$$h = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

При последовательно-параллельной схеме матрицы складываются, и тогда их сумма будет равна

$$H_{\text{об}} = \begin{vmatrix} R_{\text{вх}} + h_{11} & h_{12} \\ K + h_{21} & \frac{1}{R_{\text{вых}}} + h_{22} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Коррекция частотных характеристик линейного тракта предполагает расширение полосы пропускания и обеспечение в ней постоянства остаточного затухания. Затухание кабеля с металлическими жилами увеличивается примерно пропорционально корню квадратному из частоты [4]. Поэтому и усиление активных корректирующих элементов должно быть пропорционально корню квадратному из частоты.

На рис. 4 представлена схема смешанного включения в линию элементов отрицательных сопротивлений с усилением по току I-ПИ, последовательное включение и с усилением по напряжению U-ПИ, параллельное включение [5].

Существенным недостатком данной схемы является внесение асимметрии в линию, что недопустимо. Эта проблема, казалось бы, может быть решена с использованием изолирующих линейных трансформаторов. Но в таком случае теряется смысл идеи использования отрицательных сопротивлений в качестве корректирующих элементов амплитудно-частотных характеристик линии.

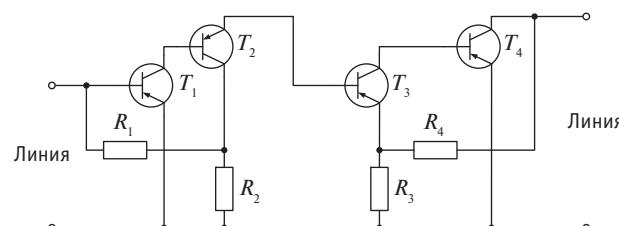


Рис. 4. Упрощенная схема реализации эквивалентов отрицательных сопротивлений

Для исключения внесения асимметрии в линейную цепь преобразователи импеданса, включенные по схеме усилителей тока или усилителей напряжения, должны подключаться через симметрирующие трансформаторы (рис. 5).

Нагрузочное сопротивление ПИ представляет собой двухполюсник с активной и емкостной составляющими, реализуемый по двух- или трехэлементной схеме (рис. 6) [6].

Использование RC -двуходовых полюсников в качестве конвертируемых сопротивлений позволяет компенсировать активную и емкостную составляющие сопротивления линии.

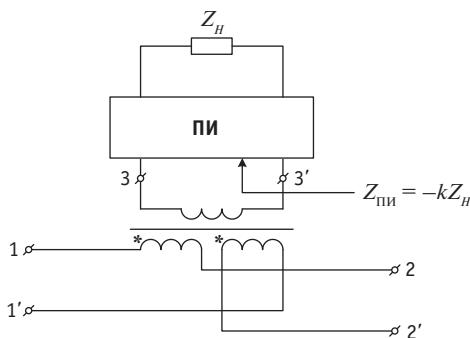


Рис. 5. Последовательное включение преобразователя импеданса

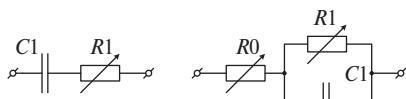


Рис. 6. Нагрузочные двухполюсники

Кроме последовательного включения преобразователя импеданса в линейную цепь имеется возможность параллельного включения преобразователя проводимости (рис. 7).

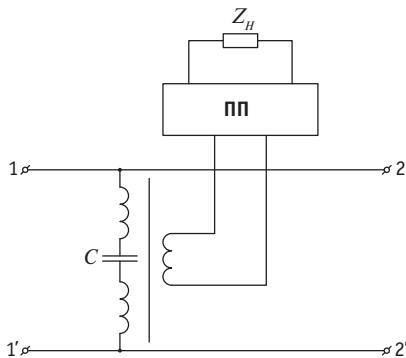


Рис. 7. Параллельное включение преобразователя проводимости

При совместном использовании преобразователя импеданса и преобразователя проводимости образуется мостовая схема (рис. 8).

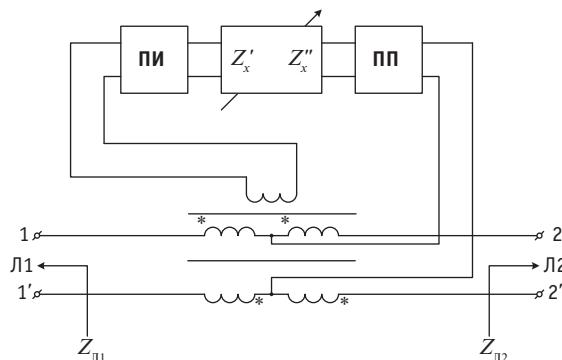


Рис. 8. Мостовая схема корректора

Конструкция ПИ – Z_H – ПП может быть заменена одним усилительным элементом (рис. 9) при условии $Z_{L1} = Z_{L2}$, т.е. при включении корректора в однородную электрически длину линию или при условии равенства нагрузочных сопротивлений с обоих концов корректируемой цепи.

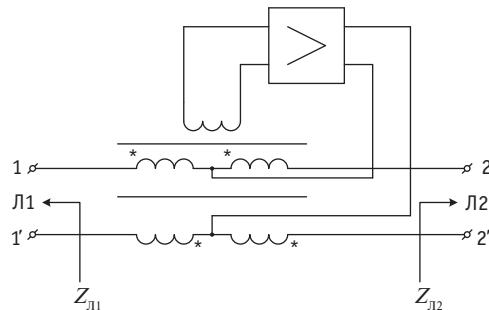


Рис. 9. Двусторонний линейный усилитель сбалансированной цепи $Z_{L1} = Z_{L2}$

На рис. 10 приведена амплитудно-частотная характеристика скорректированной линии длиной 6,8 км, кабель ТПП 0,5×2. Как видно из рис. 10, отклонение остаточного затухания не превышает существующей нормы для канала ТЧ $+1,4 \div -0,6$ дБ и может варьироваться в широких пределах.

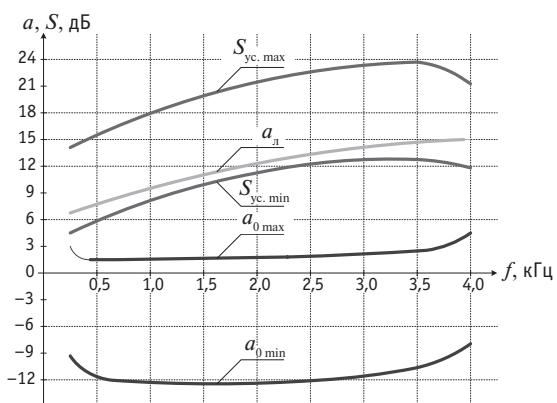


Рис. 10. АЧХ линии кабеля ТПП 0,5×2, $l = 6,8$ км:
 a_L — затухание линии; $S_{ye,max}$ — $S_{ye,min}$ — предельные значения усиления усилителя; a_{0max} — a_{0min} — предельные значения остаточного затухания

Для реализации равномерной амплитудно-частотной характеристики с заданным наклоном и линейной фазочастотной характеристики в широком частотном диапазоне с коэффициентом перекрытия порядка $10^5 \div 10^6$ раз представляется возможным использование многоканальных импульсных усилителей [7] (рис. 11).

Значения элементов входной и выходной частотно-разделительной цепи (ЧРЦ) могут быть найдены из соотношений, приведенных в [7]. Там же дана принципиальная схема трехканального импульсного усилителя,ключающего каскады усилителей высокой частоты (УВЧ), промежуточной частоты (ПЧ) и низкой частоты (УНЧ).

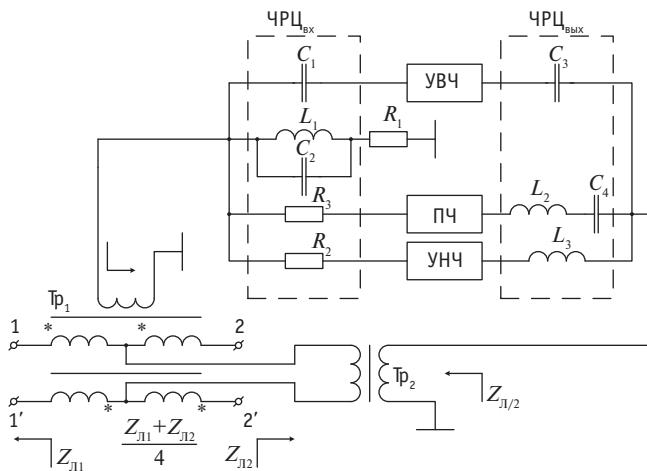


Рис. 11. Трехканальный линейный двусторонний широкополосный усилитель

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования возможности увеличения дальности и качества связи по электрическим кабелям показали малую эффективность пассивной коррекции и достаточно высокую эффективность активной коррекции, реализованной с помощью отрицательных сопротивлений.

В работе показана возможность компенсации активной и емкостной составляющих сопротивления линии с помощью преобразователя импеданса и компенсации потерь в изоляции преобразователем проводимости. Объединение схем преобразователя импеданса и преобразователя проводимости позволило реализовать двусторонний линейный усилитель, с помощью которого может быть увеличена дальность связи дуплексного канала передачи по одной паре проводов. В настоящее время двусторонние каналы строятся с использованием двух пар проводов.

Использование широкополосного усилителя позволит увеличить дальность и качество цифровых двусторонних трактов, работающих в диапазоне 1–2 МГц.

Положительным фактором рассматриваемой схемы является возможность организации дистанционного питания постоянным током без дополнительных устройств, используемых на традиционных цепях с усилителями.

Литература

- Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах / Пер. с нем. ; под ред. Д. П. Линде. М. : Сов. радио, 1975, 288 с.
- Велигжанин Н. К., Митюшев С. И. Улучшение характеристик цепей при неравномерном включении корректирующих элементов // Сб. науч. тр. Свердловск : УЭМИИТ, 1983.
- Парфенов Ю. А., Мирошников Д. Г. Последняя миля на медных кабелях. М. : Эко-Транс, 2001. 222 с.
- Петелин В. Г. О некоторых особенностях обслуживания магистрального медного кабеля // Автоматика, связь, информатика. 2002. № 8. С. 37–41. ISSN 0005-2329.
- Ланнэ А. А. Оптимальный синтез линейных электронных схем. М. : Связь, 1978. 336 с.
- Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М. : Горячая линия-Телеком, 2005. 416 с.
- Титов А. А. Транзисторные усилители мощности МВ и ДМВ. М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2012. 328 с.

References

- Bening F. Otritsatelnye soprotivleniya v elektronnykh skhemakh [Negative resistance in electronic circuits] / Per. s nem.; pod red. D. P. Linde. M. : Sov. radio, 1975, 288 s.
- Veligzhanin N. K., Mityushev S. I. Uluchshenie kharakteristik tsepey pri neravnomernom vkl'yuchenii korrektiruyushchikh elementov [Improved performance circuits with uneven inclusion of corrective elements] // Sb. nauch. tr. Sverdlovsk : UEMIIT, 1983.
- Parfenov Yu. A., Miroshnikov D. G. Poslednaya milya na mednykh kablyakh [Last mile on copper cables]. M. : Eko-Trans, 2001. 222 s.
- Petelin V. G. O nekotorykh osobennostyakh obsluzhivaniya magistral'nogo mednogo kablya [Some features of maintenance of the main copper cable] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2002. № 8. S. 37–41. ISSN 0005-2329.
- Lanne A. A. Optimalny sintez lineynykh elektronnykh skhem [Optimal synthesis of linear electronic circuits]. M. : Svyaz, 1978. 336 s.
- Gordienko V. N., Tveretsky M. S. Mnogokanal'nye telekommunikatsionnye sistemy [Multichannel telecommunication systems]. M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2005. 416 s.
- Titov A. A. Tranzistornye usiliteli moshchnosti MV i DMV [VHF and UHF transistor amplifiers]. M. : SOLON-PRESS, 2012. 328 s.

УДК 656.257

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Мария Леонидовна Ускова, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Sergey Valentinovich Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Mariya Leonidovna Uskova, graduate student, Department of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Anton Nikolayevich Popov, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Impact assessment of technical diagnosis and monitoring systems on performance reliability of railway automation and telemechanics devices in operation

Аннотация

В статье рассмотрены существующие направления оценки влияния средств диагностирования на надежность работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в эксплуатации и сделан анализ такой оценки с использованием методологии УРРАН.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, интенсивность отказов, системы технической диагностики и мониторинга, устройства железнодорожной автоматики и телемеханики.

Summary

The article examines existing directions of assessment of diagnostic means impact on performance reliability of railway automation and telemechanics (RAT) devices in operation and gives the analysis of such assessment with use of methodology of the resource management and risk analysis of reliability (URRAN system).

Keywords: performance reliability, failure rate, technical diagnosis and monitoring systems, railway automation and telemechanics (RAT) devices.

Бесперебойная организация перевозочного процесса обеспечивается устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). В свою очередь, для контроля за их исправной работой создаются специализированные сетьевые и дорожные центры, функционирование которых основано на использовании систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ), таких как АПК-ДК, АСДК, АДК-СЦБ и др. Деятельность этих центров направлена на снижение количества отказов за счет своевременного выявления предотказных состояний, сокращения времени поиска и устранения отказов, а также на повышение эффективности технического обслуживания устройств ЖАТ при помощи автоматизации [1, 2]. Для автоматизации обслуживания устройств разработчиками СТДМ вводятся в эксплуатацию адаптированные карты технологических процессов, в соответствии с которыми средствами диагностирования выполняется ряд измерений: времени переключения огней светофора с разрешающего показания на более запрещающее, силы тока электродвигателей, параметров электрических рельсовых цепей и др. [3, 4]. Следует отметить, что автоматизация позволяет не только сократить трудозатраты до 20%, но и снизить влияние человеческого фактора, а значит, повысить надежность работы устройств ЖАТ [5].

На 1 января 2013 г. по сети железных дорог России доля станций, оборудованных СТДМ, составила 32, перегонов — 25 % [6], что соответственно на 10 и 2 % больше по сравнению с 2011 г. В настоящее время центры технической диагностики и мониторинга работают на шести железных дорогах:

Октябрьской, Московской, Западно-Сибирской, Северо-Кавказской, Свердловской, Горьковской. До 2015 г. предусмотрено создание подобных центров еще на пяти дорогах [3, 4]. Таким образом, системы диагностирования получают все больше распространение, а значит, должны оказывать влияние на надежность работы устройств ЖАТ.

В настоящее время это влияние определяют на основе: качественной оценки; анализа частных случаев улучшения работы устройств ЖАТ; оценки экономической эффективности.

В процессе качественной оценки рассматриваются общие мнения, делаются выводы о влиянии диагностики на показатели надежности работы устройств. При этом снижение количества отказов, сокращение времени технического обслуживания объясняется результатом эффективного использования средств диагностирования [1]. Тем не менее не стоит забывать, что улучшение параметров надежности работы устройств достигается не только за счет СТДМ, но и за счет их постепенной модернизации, использования малообслуживаемого напольного оборудования, обучения персонала [5]. Таким образом, безотказная работа устройств ЖАТ зависит от многих факторов, и качественная оценка не позволяет определить влияние на нее СТДМ.

Частные случаи также свидетельствуют о том, что при использовании средств диагностирования надежность устройств повышается. Например, улучшение работы устройств (с сокращением отказов до 20 %) в первые годы эксплуатации было отмечено на Октябрьской железной дороге после строительства центра технической диагностики и мониторинга (ЦТДМ) [7]. Снижение количества отказов при использовании СТДМ АПК-ДК характерно и для высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург — Москва. Данные примеры свидетельствуют об эффективности использования СТДМ, но в то же время следует учитывать, что это образцовые полигоны, частные случаи, и они не дают гарантии получения подобного результата на другом объекте.

В работе [8] влияние диагностики предлагается оценивать через экономический эффект. Создание СТДМ считается оправданным, если максимальные суммарные затраты на строительство, на разработку и адаптацию программного обеспечения, на заработную плату пусконаладочного и обслуживающего персонала будут значительно меньше сэкономленных средств от выявленных предотказов с учетом тяжести их возможных последствий. Оценить экономический эффект от использования СТДМ в эксплуатации за рассматриваемый период наблюдения [0; T] по одной из существующих методик [8] предлагается с помощью выражения

$$\sum_{i=0}^T p_j \cdot (N - N_{\text{он}} + N_{\text{нн}} + N_{\text{ну}}) + \sum_{i=0}^T (E_d)_t > \sum_{i=0}^T K_t, \quad (1)$$

где p_j — средние потери от возникновения одного отказа; N — общее число отказов за весь период наблюдения; $N_{\text{он}}$ — число обнаруженных и не предотвращенных отказов; $N_{\text{нн}}, N_{\text{ну}}$ — число необнаруженных и незафиксированных отказов; E_d — экономия средств за рассматриваемый период работы;

K_t — суммарные капитальные затраты за весь период эксплуатации (внедрение, строительство, амортизация, эксплуатация СТДМ).

Однако для расчета экономического эффекта по выражению (1) необходимы данные, информация по которым не всегда известна и доступна.

Таким образом, определить влияние средств диагностирования на надежность работы устройств при эксплуатации затруднительно — на сегодняшний день ни одно из существующих направлений не позволяет это сделать. Поэтому разработка эффективного метода оценки до сих пор остается актуальной проблемой.

В настоящее время на сети железных дорог внедряется методология управления ресурсами, рисками и анализом надежности (УРРАН). Но УРРАН не учитывает влияние СТДМ на безотказность работы устройств ЖАТ. В методологии диагностика не выделяется в отдельный эталонный объект и не учитывается системой поправочных коэффициентов [9].

С использованием методологии УРРАН можно предложить метод, позволяющий оценить влияние СТДМ на основе сравнения показателей надежности работы устройств на станциях, оборудованных и не оборудованных диагностикой. Структурное изображение этого метода представлено на рис. 1.

Сопоставить работу станций, оборудованных и не оборудованных диагностикой, можно по интенсивностям отказов (λ_ϕ), интенсивностям времени восстановления (μ_ϕ) и по времени технического обслуживания (T_ϕ).

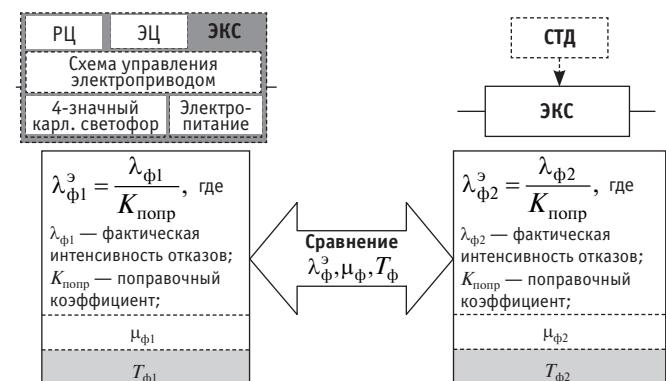


Рис. 1. Метод оценки влияния СТДМ с использованием методологии УРРАН

Сложность сравнения заключается в необходимости учета различных фактических условий эксплуатации ЖАТ и СТДМ. Поэтому к интенсивностям отказов и интенсивностям времени восстановления в методологии УРРАН разработана система поправочных коэффициентов, учитывающая оснащенность ($k_{\text{осн}}$), интенсивность движения (k_v) и климатические условия эксплуатации (k_k). К сожалению, о возможности применения поправочных коэффициентов к времени технического обслуживания в методологии ничего не говорится. Для сравнения работы станций по времени технического обслуживания и интенсивностям времени восстановления, по мнению авторов, возможна разработка дополнительных коэффициентов, учитывающих

удаленность от центра, квалификацию обслуживающего персонала, укомплектованность дистанции техническими средствами и другие влияющие факторы.

С использованием предложенного метода появляется возможность оценить влияние СТДМ на надежность работы устройств ЖАТ при эксплуатации, а также расширить применение методологии УРРАН.

Для проверки влияния СТДМ на надежность ЖАТ и использования предложенного метода сравним статистические данные по одной из железных дорог за последние три года. Данные по отказам перегонных систем разделим на две группы: оборудованные и не оборудованные диагностикой, по отказам станционных систем — на три группы: релейные системы ЭЦ, оборудованные и не оборудованные диагностикой, и микропроцессорные системы (МПЦ), оснащенные диагностикой.

Влияние СТДМ при опробировании метода оценим сравнением интенсивностей отказов по выделенным группам. При этом ожидаем подтверждение следующих гипотез:

системы, оснащенные СТДМ, за счет своевременного выявления предотказных состояний должны иметь меньшую интенсивность отказов, меньшее время поиска и устранения отказов;

МПЦ являются резервируемыми системами со встроенными самопроверяемыми средствами диагностирования, поэтому должны иметь наименьшую интенсивность отказов среди всех выделенных групп ЭЦ [10];

применение коэффициентов УРРАН в процессе обработки данных должно приводить к выравниванию интенсивности отказов релейных и микропроцессорных систем на 1 ЭКС.

Для выделенных групп станционных устройств определим среднюю фактическую интенсивность отказов $\lambda_{\phi, cp}$, приведенную на один эталонный комплекс управления стрелкой (1 ЭКС), т.е. с учетом коэффициентов методологии УРРАН, и приведенную на стрелку без учета коэффициентов (1 С), с использованием выражений (2) и (3):

$$\lambda_{\phi, cp, 1EC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\phi, i}}{N_i \cdot k_i}, \quad (2)$$

где n — число рассматриваемых станций;

$\lambda_{\phi, i}$ — фактическая интенсивность отказов на i -й станции;
 N_i — число стрелок на i -й станции;

k_i — поправочные коэффициенты, для i -й станции, предлагаемые в методологии УРРАН;

$$\lambda_{\phi, cp, 1C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{\phi, i}}{N_i}. \quad (3)$$

Аналогично определим среднюю фактическую интенсивность отказов для выделенных групп перегонных устройств, приведенную на один эталонный блок-участок (с учетом поправочных коэффициентов методологии УРРАН — 1 ЭБУ) и на один блок-участок без учета коэффициентов (1 БУ).

Результаты средней фактической интенсивности отказов для перегонных и станционных систем показаны на рис. 2.

Полученные результаты средних фактических интенсивностей отказов для перегонных и станционных систем, оборудо-

ванных диагностикой, не подтверждают выдвинутые гипотезы, что можно объяснить наличием неучтенных факторов, сильно действующих на интенсивность отказов.

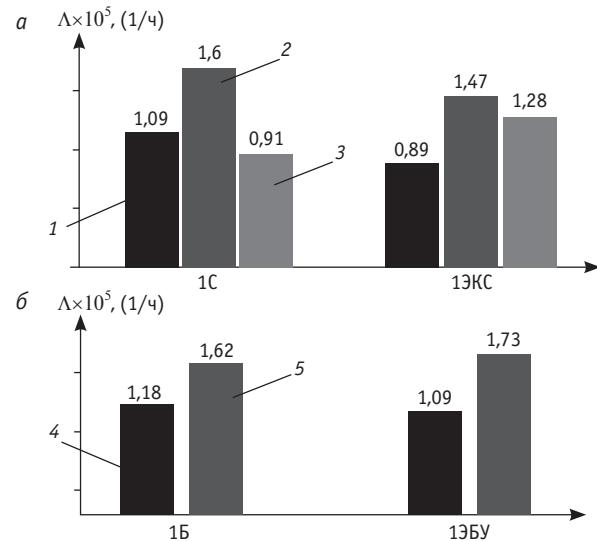


Рис. 2. Среднее значение фактических интенсивностей отказов ($\Lambda = \lambda_{\phi, cp}$) для станционных (а) и перегонных (б) систем, $\Lambda \cdot 10^5$, (1/4):
1 — для всех ЭЦ без диагностики; 2 — для релейных ЭЦ с диагностикой;
3 — для МПЦ с диагностикой; 4 — для всех перегонов без диагностики;
5 — для перегонов с диагностикой

Первым фактором может быть снижение качества обслуживания устройств из-за «занятого ожидания» от использования диагностики на фоне более четкой фиксации фактов отказов. Средствами диагностирования выполняется только измерение и передача обслуживающему персоналу контролируемой информации о параметрах работы устройств для ее последующего анализа и выявления предотказных состояний. К сожалению, часто не уделяется должного внимания зафиксированной системой диагностики фактам предотказов (возможно, из-за их значительного количества и недостатка времени на устранение). Поэтому не стоит забывать, что за работников дистанций СЦБ никто не выполнит своевременного ремонта и замены оборудования, так как эти функции диагностика не выполняет.

Другим фактором высокой интенсивности отказов по данным статистики для систем, оборудованных диагностикой, может быть период послепусковой приработки. СТДМ внедряются при строительстве ЭЦ последние 10 лет, а для вновь построенных станций существует период приработки, который продолжается до пяти лет и характеризуется наибольшим числом отказов и дефектов [11].

Для проверки гипотезы о влиянии приработки на интенсивность отказов используем данные о времени строительства ЭЦ на станциях. На основе тех же данных и методики найдем интенсивности отказов для групп стрелок (станций) с учетом срока эксплуатации (построенных в разное время). Полученные значения средней интенсивности отказов, приведенной на стрелку по периодам строительства, изображены на рис. 3.

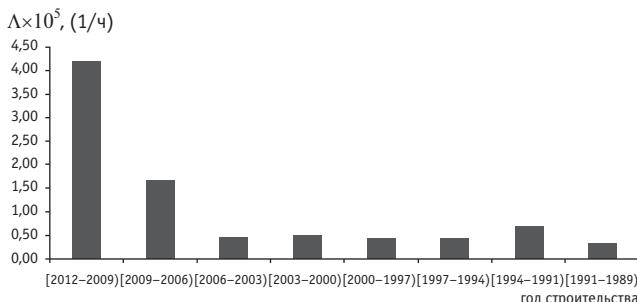


Рис. 3. Средняя интенсивность отказов на стрелку ($\Lambda = \lambda_{\phi, \text{ср.1C}}$) для всех ЭЦ, $\Lambda \cdot 10^5, (1/\text{ч})$

Интенсивности отказов, приведенные на стрелку по периодам строительства с разложением по типу ЭЦ и наличию СТДМ, показаны на рис. 4.

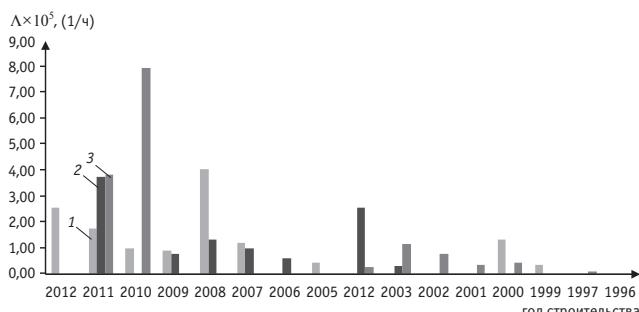


Рис. 4. Средняя интенсивность отказов на стрелку ($\Lambda = \lambda_{\phi, \text{ср.1C}}$) с разложением по типу ЭЦ и наличию СТДМ, $\Lambda \cdot 10^5, (1/\text{ч})$:
1 — для ЭЦ с диагностикой; 2 — для МПЦ с диагностикой;
3 — для ЭЦ без диагностики

Результаты, представленные на рис. 3, подтверждают пятилетний период приработки [11] и показывают, что сравнивать интенсивности отказов систем с разным сроком эксплуатации некорректно. Из рис. 3 видно, что для станций, построенных за последние три года (в период с 2010 по 2012 г.), интенсивность отказов без учета типа ЭЦ в 5 раз больше, чем у систем, для которых период приработки закончился. Начиная с периода 1989–2006 гг. средняя интенсивность отказов по интервалам строительства остается практически неизменной, т.е. рис. 3 отображает информацию об интенсивностях отказов при эксплуатации на стадиях приработки и устойчивого режима.

Деление данных на три категории по типам применяемых систем (см. рис. 4), к сожалению, привело к снижению стабильности результатов. Тем не менее из графика средней интенсивности отказов с разложением по типу ЭЦ и наличию СТДМ видно, что с 2007 по 2012 г. строились все типы станционных систем — и с диагностикой, и без нее. В целом значения интенсивностей отказов по выделенным интервалам строительства для ЭЦ с диагностикой меньше, что свидетельствует о положительном влиянии последней на надежность работы устройств ЖАТ.

Таким образом, при анализе влияния технической диагностики на надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики нельзя пренебречь периодом приработки, в котором интенсивность отказов в 5 раз выше, чем в установившемся режиме эксплуатации. Поскольку массовое внедрение СТДМ и МПЦ со встроенными средствами диагностики происходило последние 10 лет, то анализ влияния этих устройств нужно проводить с учетом срока эксплуатации. Незначительное в статистическом смысле количество стрелок, вводимых в эксплуатацию на дороге в течение года, не позволяет с помощью предложенной в статье методики получить достаточно стабильные данные для оценки влияния СТДМ на среднюю интенсивность отказа ЭЦ. Однако эти результаты показывают, что такая связь существует, поэтому при расширении выборки возможно установить ее численно.

Литература

- Насонов Г. В. Цель — повышение надежности устройств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 6. С. 2–4. ISSN 0005-2329.
- Ефанов Д. В., Басалаев Е. В., Алексеев В. Г. Функциональное диагностирование стрелочных электроприводов переменного тока // Транспорт Урала. 2012. № 4 (35). С. 26–29. ISSN 1815-9400.
- Технологический процесс автоматизированного контроля параметров устройств СЦБ средствами технического диагностирования и мониторинга автоматизированной системы диспетчерского контроля АПК-ДК : сборник карт технологического процесса. М., 2013.
- Пахомова Н. Развивать технологию диагностики и мониторинга // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 3. С. 3–4. ISSN 0005-2329.
- Насонов Г. Ф. Оптимизация невозможна без инноваций // Автоматика, телемеханика и связь. 2013. № 9. С. 2–5. ISSN 0005-2329.

References

- Nasonov G. V. Tsel — povyshenie nadezhnosti ustrojstv ZhAT [The objective is to increase the reliability of RAT (railway automation and telemechanics) devices] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2012. № 6. S. 2–4. ISSN 0005-2329.
- Efanov D. V., Basalayev E. V., Alexeyev V. G. Funktsionalnoe diagnostirovanie strelochnykh elektroprivodov peremennogo toka [Functional diagnostics of AC electric switch mechanisms] // Transport of the Urals. 2012. № 4 (35). S. 26–29. ISSN 1815-9400.
- Tekhnologicheskij protsess avtomatizirovannogo kontrolya parametrov ustrojstv SbS sredstvami tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa avtomatizirovannoj sistemy dispatcherskogo kontrolja APK-DK : sbornik kart tekhnologicheskogo protsessa [Technological process of automated control of signaling devices' parameters by means of technical diagnosis and monitoring of automated dispatch control system (APK-DK) : hardware-software complex of dispatch control]. M., 2013.
- Pakhomova N. Razvivat tekhnologiju diagnostiki i monitoringa [To develop the technology of diagnosis and monitoring] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2011. № 3. P. 3–4. ISSN 0005-2329.
- Nasonov G. F. Optimizatsiya nevozmozhna bez innovatsij [Optimization is not possible without innovation] // Avtomatika, telemehanika i svyaz. 2013. № 9. S. 2–5. ISSN 0005-2329.

6. Анализ состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики в 2012 году. М., 2013.
7. Ефанов Д. В. О методе выявления логических ситуаций в системах технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Вестник РГУПС. 2010. № 4. С. 66–70. ISSN 0201-727X.
8. Эффективность систем технической диагностики и мониторинга состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков. Д. В. Ефанов и др. // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 4 (29). С. 47–49. ISSN 1994-831X.
9. Управление ресурсами, рисками на этапах жизненного цикла и анализом надежности в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики. М., 2012.
10. Средства технической диагностики и удаленного мониторинга СТД-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, К. В. Гундырев и др. // Автоматика, телемеханика и связь. 2012. № 10. С. 6–8. ISSN 0005-2329.
11. Штульман Н. А. О надежности систем железнодорожной автоматики в период послепусковой приработки // Автоматика, телемеханика и связь. 1974. № 2. С. 18–21. ISSN 0005-2329.
6. Analiz sostojaniya bezopasnosti dvizheniya poezdov, nadezhnosti raboty sistem i ustrojstv ZhAT v hozjajstve avtomatiki i telemekhaniki v 2012 godu [Analysis of safety of train traffic, performance reliability of railway automation and telemechanics devices in automation and telemechanics facilities in 2012]. M., 2013.
7. Ef'anov D. V. O metode vyjavlenija logicheskikh situatsij v sistemakh tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [On identification method of logistic situations in technical diagnosis and monitoring systems of railway automation and telemechanics devices] // Vestnik RGUPS. 2010. № 4. S. 66–70. ISSN 0201-727X.
8. Effektivnost' sistem tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa sostoyaniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Efficiency of technical diagnosis and monitoring systems of railway automation and telemechanics devices status] / Vl. V. Sapozhnikov, A. A. Lykov. D. V. Ef'anov i dr. // Transport Rossijskoj Federatsii. 2010. № 4 (29). S. 47–49. ISSN 1994-831X.
9. Upravleniye resursami, riskami na etapakh zhiznennogo tsikla i analizom nadezhnosti v khozjajstve zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Control of resources, risks on stages of lifecycle and reliability analysis in railway automation and telemechanics facilities]. M., 2012.
10. Sredstva tekhnicheskoy diagnostiki i udalennogo monitoringa STD-MPK [Means of technical diagnosis and remote monitoring] / A. B. Nikitin, S. V. Bushuev, K. V. Gundyr'ev i dr. // Avtomatika, telemekhanika i svyaz. 2012. № 10. S. 6–8. ISSN 0005-2329.
11. Shtul'man N. A. O nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki v period poslepuskovoj prirabotki [On reliability of railway automation systems in the period of post completion break in] // Avtomatika, telemekhanika i svyaz. 1974. № 2. S. 18–21. ISSN 0005-2329.

УДК 534.836.3

Александр Михайлович Асонов, доктор биологических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Олег Рашитович Ильясов, доктор биологических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
 Галина Михайловна Борисова, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения, (УрГУПС), Екатеринбург

ФИЛЬТРУЮЩАЯ ПОЛОСА В СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ

Alexander Mikhaylovich Asonov, DSc in Biology, Professor, Department of Technospheric Safety, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Oleg Rashitovich Ilyasov, DSc in Biology, Professor, Department of Technospheric Safety, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Galina Mikhaylovna Borisova, Senior Lecturer, Department of Technospheric Safety, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Filter strip as a part of railway embankments

Аннотация

В статье рассматривается проблема защиты водных объектов от негативного воздействия поверхностного стока с территорий предприятий железнодорожного транспорта. Отмечена специфика образования, предложена новая концепция очистки поверхностного стока и биосооружение в виде фильтрующей полосы. Приведены расчеты, подтверждающие перспективность строительства фильтрующих полос в местах интенсивного загрязнения железнодорожного полотна нефтепродуктами.

Ключевые слова: фильтрующая полоса, поверхностные сточные воды, аккумуляционный фитофильтр, сорбент, фильтрация.

Summary

The paper deals with problem of protection of water bodies from the negative effects of surface runoff from railway facilities. Specific features of runoff generation are marked, a new concept of surface runoff cleaning and bio structure as a filter strip are proposed. Analysis confirming the prospects of construction of filter strips in areas of intensive oil pollution of railroad tracks is provided.

Keywords: filter strip, surface waste waters, accumulation phytofilter, sorbent, filtration.

Вопросы глубокой очистки диффузного поверхностного стока от загрязнений остаются весьма актуальными для предприятий железнодорожного транспорта, на территории которых осуществляется сортировка и формирование составов. В период отсутствия поверхностного стока на железнодорожных путях образуется основная масса загрязняющих веществ, которые с талыми водами за сравнительно короткий период (10–15 сут) удаляются диффузно на рельеф либо непосредственно в водный объект.

Из-за специфики поверхностного стока, который характеризуется неравномерностью поступления и изменчивостью химического состава, экономически нецелесообразно строить в местах постоянного массированного загрязнения железнодорожной насыпи традиционные очистные сооружения, рассчитанные на круглогодичный прием сточных вод.

Очевидно, что существует необходимость разработки технологии очистки поверхностного стока на локальных сооружениях, максимально приближенных к источнику загрязнения, до поступления диффузного стока по рельефу в водоемы.

В Уральском государственном университете путей сообщения проведены обширные исследования загрязненности поверхностного стока и почвогрунтов на железнодорожных станциях [1–4]. В результате установлено, что в стоке содержится широкий спектр поллютантов, которые образуются при снеготаянии и выпадении дождей. Для определения качественного и количественного состава талого стока были выполнены мониторинговые исследования снега с территории станции Екатеринбург-Сортировочный. При этом исследовался как свежевыпавший снег, так и слой снега, выпавшего за весь сезон. Для анализа отобранный в разных точках станции снег растапливался, а определение загрязняющих веществ выполнялось в талой воде.

Результаты исследований показали наличие в талой воде не только традиционно контролируемых загрязнений — нефтепродуктов и взвешенных веществ, но и полной гаммы

азотсодержащих веществ, а также ионов тяжелых металлов. Кроме того, было зафиксировано значительное (от 2 до 10 раз) превышение концентрации поллютантов, особенно взвешенных веществ, нефтепродуктов, фосфора, ионов железа, меди и цинка, в нижних слоях снега по сравнению со свежевыпавшим.

Анализ профильтрованной через бумажный фильтр талой воды позволил установить, какую роль играют взвешенные вещества в процессе очистки от ионов тяжелых металлов (свинец, медь, цинк). Поскольку содержание этих ионов в фильтрате талой воды составляло от 30 до 60 % от их общей концентрации, можно утверждать, что от 40 до 70 % ионов тяжелых металлов адсорбируются взвешенными веществами, а значит, могут быть удалены из поверхностного стока вместе со взвесью достаточно простыми методами — отстаиванием и фильтрацией. Концентрация нефтепродуктов в талом стоке также может быть снижена на 30 % при удалении взвеси методом фильтрации через пористую среду, т.е. через обычные осветлительные фильтры.

Следует отметить, что значительная часть нефтепродуктов, попавших на железнодорожное полотно, адсорбируется почвогрунтами (балластом), и их десорбция поверхностным стоком значительно растянута во времени [5].

Уже в летний период, но в тех же контролируемых точках нами были проведены исследования по изучению качественного состава почвогрунтов с глубин 5 и 15 см от поверхности. Результаты исследований свидетельствуют о мощном загрязнении почвогрунтов в районе станции Екатеринбург-Сортировочный.

Таким образом, выполненные мониторинговые исследования позволили установить значительную загрязненность снежного покрова и почвогрунтов в районе железнодорожного полотна взвешенными и биогенными веществами, а также нефтепродуктами и ионами тяжелых металлов. Анализ сооружений и технологий, предназначенных для очистки поверхностного стока, показывает, что в большинстве случаев используются методы механической очистки от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Для повышения качества очистки применяются химические реагенты (коагулянты и флокулянты). Такие стационарные, размещенные в отапливаемых помещениях сооружения для очистки периодически возникающего поверхностного стока большую часть года не загружены. Следует отметить, что используемый набор сооружений не может обеспечить глубокую очистку сточных вод от биогенных веществ и тяжелых металлов, наличие которых наглядно демонстрируют результаты наших исследований.

Для поверхностного стока, образующегося только в теплый период года, наиболее целесообразно применение биоинженерных систем, технология очистки в которых максимально приближена к природным процессам биорегенерации водных объектов. Биологическая очистка на ботанических площадках с высшей водной растительностью (ВВР) достаточно глубоко проработана в научном и практическом аспектах [6, 7]. Для данной категории стоков ботанические площадки обладают целым рядом преимуществ по сравнению с сооружениями промышленного типа. В частности, они естественным образом вписываются в природу, очищая при этом широкий спектр загрязнений (взвешенные вещества минерального и органического происхождения, серные и азотные соединения, фосфаты, тяжелые металлы, патогенная микрофлора), характеризуются

высокой стабильностью процесса очистки (даже при изменении режима поступления стоков и их качества) и минимальными эксплуатационными затратами.

Однако и у этих сооружений имеются недостатки, главный из которых — относительно низкая скорость очистки воды: время очистки составляет 7–10 сут, что обусловлено скоростью биохимических процессов окисления, сорбции и отстаивания поллютантов. В связи со значительными объемами талого и дождевого стока, поступающего эпизодически, ботанические площадки должны иметь соответствующие размеры, что достаточно трудно осуществить в пределах городской территории. Кроме того, на ботанических площадках глубокая очистка сточных вод возможна только в вегетационный период (конец мая — начало сентября). Талый и позднеосенний сток не получает должной обработки и сбрасывается в природные водные объекты недостаточно очищенным. Это снижает природоохраненный эффект и не позволяет использовать ботанические площадки в качестве единственного сооружения защиты водоисточников от загрязнения поверхностным стоком.

Нами предложена новая концепция очистки поверхностного стока, учитывающая специфику его образования. Суть концепции заключается в применении физико-химических методов очистки, позволяющих с достаточно высокой скоростью изъять загрязняющие вещества на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК), и в использовании высшей водной растительности и микрофлоры в вегетационный период для деструкции и утилизации загрязнений.

В соответствии с этой концепцией разработана конструкция очистного сооружения для глубокой очистки поверхностного стока в виде двухступенчатого агрегатопонного комплекса — аккумуляционного фитофильтра (АФФ) [8]. Обе ступени фитофильтра имеют фильтрующую загрузку из природных сорбционных материалов — клиноптилолита или опоки. Фильтрующая загрузка (высота слоя 0,4 м) кроме своей основной задачи (задержание взвеси, нефтепродуктов, биогенных веществ и ионов тяжелых металлов) выполняет функцию твердого субстрата, в который высаживаются высшие водные растения — тростник. В отличие от обычных конструкций биоплощадок с горизонтальным движением очищаемой воды, жидкость в фитофильте движется в вертикальном направлении: на первой ступени — сверху вниз, на второй — снизу вверх. Это дает возможность вести глубокую очистку сточных вод за счет использования физико-химических методов (фильтрация, сорбция, адгезия, ионные обмены) в любой период образования стока, а биодеструкцию и утилизацию органических и биогенных веществ, ионов тяжелых металлов с помощью ризосферы ВВР — в теплый период года.

Высокие скорости очистки воды в процессе фильтрации поверхностного стока через твердый субстрат фитофильтра, представленного в виде природных ионообменных материалов, позволяют значительно уменьшить (в 50–100 раз) размеры ботанических площадок, а также территорий, занятых под пруды-усреднители.

Для изучения возможности применения природных сорбентов в АФФ в качестве фильтрующей загрузки (твердый субстрат) нами были выполнены исследования сорбционной емкости клиноптилолита и опоки и эффективности очистки стока

от вышеперечисленных поллютантов. В исследованиях использовались клиноптилолит Читинского месторождения и опока Сухоложского месторождения Свердловской области.

Исследования показали высокую степень очистки имитаторов поверхностного стока при скорости фильтрации 0,3 м/ч через клиноптилолит и опоку: по $\text{Fe}_{\text{общ}}$ — 86–99 и 92–97 %, по Zn^{2+} — 89–99 и 97–99,5 %, по Cu^{2+} — 97–99 и 99,6–99,9 % соответственно. Качество доочищенных сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью природных сорбентов соответствует требованиям, предъявляемым к водным объектам хозяйственно-бытового назначения. При выборе сорбента следует руководствоваться только экономическими соображениями (стоимостью, удаленностью и разработанностью месторождения, транспортными расходами).

Решая конкретную технико-экологическую задачу защиты ландшафтного комплекса, примыкающего к железнодорожной насыпи, в качестве высокоэффективного, надежного и сравнительно дешевого водозащитного устройства мы предлагаем использовать фильтрующую полосу, входящую в состав железнодорожной насыпи на участке с повышенной загрязненностью нефтепродуктами (места налива нефтепродуктов или формирования составов, перевозящих нефтепродукты). Фильтрующей основой должна стать порода, обладающая сорбционными и ионообменными свойствами. Это позволит очищать поверхностный сток (как талый, так и ливневой) с железнодорожной насыпи от взвеси, нефтепродуктов, биогенов и тяжелых металлов до нормативных показателей в течение длительного периода и с минимальными эксплуатационными затратами.

Конструктивное оформление фильтрующей полосы представлено на рис. 1.

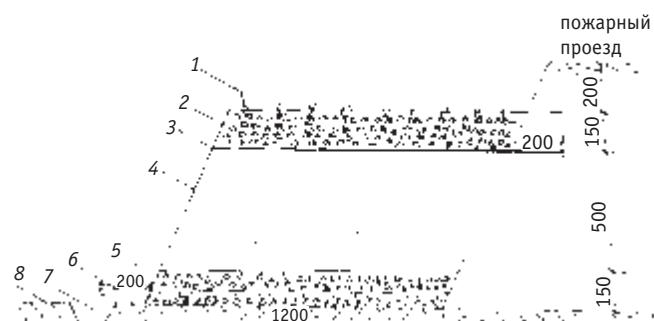


Рис. 1. Фильтрующая полоса (поперечный разрез):

1 — многолетние травы; 2 — слой повышенной грязеемкости (многолетние травы); 3 — дырчатая распределительная диафрагма; 4 — сорбционный слой (опока); 5 — дренаж (щебень); 6 — труба для отбора фильтрата на качество; 7 — приямок; 8 — естественный грунт

Полоса представляет собой трехслойный лентообразный фильтр, примыкающий к железнодорожной насыпи. Ширина фильтрующей полосы 1,2, высота — 0,8 м. Откос полосы, как и у насыпи, 1:1,5.

Нижний слой полосы представляет собой дренажную систему из щебня (гравия) высотой слоя 150 мм с размером гранул 2,0–10 мм, который укладывается на грунт. Средний (основной) фильтрующий слой, обладающий сорбционной спо-

собностью по нефти, выполнен из опоки (опалкристобалитовая порода). Высота слоя 500 мм с размером гранул 1–2 мм. Верхний слой полосы состоит из щебня (гравия) высотой 150 мм, размер гранул 2–10 мм. Его назначение — гашение скорости потока поверхностных вод перед поступлением в зону фильтрации (во второй слой) и выделение из потока взвеси большой гидравлической крупности.

Между фильтрующим слоем из опоки и верхним слоем из щебня укладывается дырчатая полимерная распределительная диафрагма. Ее назначение — перевод движения поверхностного стока из горизонтального направления в вертикальное, что способствует равномерному распределению стока по площади фильтрующей полосы. Край распределительной диафрагмы должен заходить в тело железнодорожной насыпи на 200–300 мм. Общая ширина диафрагмы 1400–1500 мм. Материалом для диафрагмы могут служить геомембранны, изготавливаемые из полипропиленового (толщиной 1 мм) и поставляемые в рулонах.

Верхний слой фильтрующей полосы желательно засеять многолетними травами (из расчета 40 г/м²). Их ризосфера в виде мочковатой корневой системы включает бактериальную микрофлору. В состав последней входят и нефтеразрушающие бактерии, способствующие самоочищению от задержанного верхним слоем полосы нефтезагрязненного грунта и адсорбированных на фильтрующей загрузке нефтепродуктов.

Для контроля за качеством поверхностного стока, профильтрованного через полосу, в ее дренажную систему рекомендуется перпендикулярно насыпи уложить перфорированные трубы диаметром 50 мм с отверстиями диаметром 2–3 мм через 100 м по фронту насыпи.

Чтобы обосновать перспективность выбранного решения, нами были выполнены гидрометеорологические расчеты расходов и объемов талого и дождевого стока и их вероятного качественного состава. В основу расчетов положена исходная информация из технического отчета [9].

При расчете расходов и объемов поверхностного стока мы учитывали специфику железнодорожной насыпи как объекта канализования — ее значительную длину при малой ширине, имеющей постоянный уклон в одну сторону. В связи с этим поверхностный сток был признан диффузионным и равномерным по всей длине насыпи.

Среднегодовой объем W_t (м³) талого стока в период весеннего снеготаяния определен из расчета на 1 пог. м железнодорожного полотна при его ширине 33,19 м по формуле [10]

$$W_t = 10 \cdot h_0 \cdot F \cdot \Psi_t \cdot K_y,$$

где h_0 — средний из наибольших запасов воды за зиму, равен 107 мм [9];

F — общая площадь водосбора, приходящаяся на 1 пог. м железнодорожного пути, м²/пог. м;

Ψ_t — коэффициент стока талых вод, принят равным 0,8 [5];

K_y — коэффициент, учитывающий вывоз и уборку снега, принят равным 0,8 [10].

Таким образом,

$$W_t = 10 \cdot 0,107 \cdot 33,19 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 22,73 \text{ м}^3/\text{пог. м/год}.$$

Максимальный суточный объем стока ($\text{м}^3/\text{сут}$ на 1 пог. м железнодорожной насыпи) при снеготаянии рассчитан по формуле [5]

$$W_{\text{сн.макс сут}} = 10 \cdot h_t \cdot F \cdot K_y,$$

где h_t — слой стока за 10 дневных часов, мм, принят по табл. 5 [10], с учетом вероятности превышения (10%) $h_t = 37 \text{ мм}$.

Итак,

$$W_{\text{сн.макс сут}} = 10 \cdot 0,037 \cdot 33,19 \cdot 0,8 = 9,82 \text{ м}^3/\text{сут/пог. м}.$$

Следует учесть, что решающим будет не весь запас воды в снеге, который постепенно поступает на водосбор в течение 3–10 сут, а наибольший из дневных расходов в середине снеготаяния. Интенсивное снеготаяние начинается в 10.00 и заканчивается в 20.00, т.е. весь интенсивный процесс стока продолжается около 10 ч.

Таким образом, в период максимального снеготаяния с 1 пог. м железнодорожного пути объем максимального расхода талого стока составит $0,98 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,27 \text{ л}/\text{с}$).

Расчет расходов и объемов дождевого стока выполнялся с учетом того, что в данной технологии очистки сток не аккумулируется. Интерес представляет его общий объем только с позиции количества загрязняющих веществ, поступающих на водоочистное устройство (фильтрующую полосу).

Объем дождевого стока рассчитан по формуле

$$W_{\text{дождь}} = 10 \cdot h_d \cdot Z_{\text{mid}} \cdot F,$$

где h_d — среднегодовое количество осадков за теплый период (апрель – октябрь), составляет 342 мм [9];

Z_{mid} — среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока; для щебеночной поверхности 21–23-го пути при $F = 16,6 \text{ м}^2$ Z_{mid} принят 0,125 [11, табл. 9], для 24-го пути при $F = 9,33 \text{ м}^2$ принят 0,09, для пожарного проезда при $F = 7,26 \text{ м}^2$ принят 0,224;

F — площадь стока из расчета на 1 пог. м железнодорожной насыпи, равная $33,19 \text{ м}^2$.

Таким образом, с учетом коэффициентов качества поверхности железнодорожного полотна (0,125, 0,09 и 0,224) и соответствующих площадей ($16,6, 9,33$ и $7,2 \text{ м}^2$) среднегодовое количество дождевого стока будет равно

$$W_{\text{дождь}} = 7,09 + 2,87 + 5,56 = 15,52 \text{ м}^3/\text{пог. м/год}.$$

Следовательно, объем талого и дождевого стока составит

$$W_{\text{год}} = W_t + W_{\text{дождь}} = 22,73 + 15,52 = 38,25 \text{ м}^3/\text{пог. м}.$$

Расчетный расход дождевых вод q_r ($\text{л}/\text{с}$) определяется по формуле [11]

$$q_r = \frac{Z_{\text{mid}} \cdot A^{1,2} \cdot F}{t_r^{(1,2n-0,1)}},$$

где Z_{mid} — среднее значение коэффициента, характеризующего поверхность бассейна стока;

A, n — параметры, принимаемые по [11, п. 2.12];

F — расчетная площадь стока, га ;

t_r — расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания поверхностных вод по поверхности до расчетного участка, принятая 10 мин [11, п. 2.16].

Выполненные расчеты показывают, что с учетом коэффициентов, характеризующих поверхность стока на разных участках железнодорожного полотна, расход дождевого стока составит $q_r = 0,42 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Сравнение максимальных расходов талого ($0,98 \text{ м}^3/\text{ч}$) и дождевого ($0,42 \text{ м}^3/\text{ч}$) стока показывает, что при определении максимальной скорости фильтрации через фильтрующую полосу следует ориентироваться на талый сток.

Если принять рабочую площадь фильтрации из расчета $(a \times b) = 1,2 \text{ м}^2$, то максимальная скорость фильтрации дождевого стока составит

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{0,42}{1,2} = 0,35 \text{ м}/\text{ч},$$

талого стока

$$V = \frac{0,98}{1,2} = 0,82 \text{ м}/\text{ч}.$$

Полученные скорости фильтрации свидетельствуют, что по механизму задержания взвешенных веществ рассматриваемый тип фильтрующей полосы следует отнести к медленным фильтрам, т.е. к тем, в которых фильтрация происходит через образующуюся на поверхности зернистой загрузки пленку. В этом случае задерживаются практически все взвешенные вещества (99%), а время контакта растворенных нефтепродуктов с сорбентом (опокой) будет не менее 30 мин, что обеспечит эффективность в пределах 99 %.

Расчет качества талого и дождевого стока, профильтрованного через фильтрующую полосу, был выполнен на основании средних показателей концентраций поллютантов в поверхностном стоке [9]: по взвешенным веществам — 250, нефтепродуктам — 20 $\text{мг}/\text{дм}^3$.

На основании собственных исследований [12] было установлено, что большая часть таких загрязнений, как нефтепродукты и ионы тяжелых металлов, входящих в поверхностный сток, находится в адсорбированном на взвешенных веществах состоянии: железо общее — 50 %, медь — 75 %, цинк — 70 %, свинец — 83 %, нефть — 30 %.

Учитывая, что при фильтрации через пористую среду слоя полосы со скоростью 0,4–1,0 $\text{м}/\text{ч}$ будет задержано 99 % взвешенных веществ, качество фильтрата, поступающего на средний (сорбционный) слой, следует ожидать по взвешенным веществам с концентрацией 2–3, а по нефтепродуктам — 14 $\text{мг}/\text{дм}^3$.

Известно, что в водной среде нефтепродукты находятся в грубодисперсном, коллоидном и истинно растворенном состоянии. При этом на нефтепродукты, находящиеся в истинно растворенном состоянии, приходится 25 % от общего количества.

В нашем случае

$$C_{\text{ист.р.н/п}} = \frac{14 \cdot 25}{100} = 3,5 \text{ мг/дм}^3.$$

На основании исследований [12] установлено, что рекомендуемый в качестве сорбента природный ионообменный минерал опока (опалкристобалитовая порода) при скорости фильтрации поверхностного стока в пределах 0,4–1,0 м/ч очищает его от нефтепродуктов до нормативных для рыбохозяйственных водных объектов показателей, т.е. до концентрации менее 0,05 мг/л. Эффект очистки составляет 98,5–99,0 %.

Таким образом, прогнозируемое качество поверхностного стока, профильтрованного через фильтрационную полосу, состоящую из опоки, составит

$$C_{\text{оч.н/п}} = \frac{3,5 \cdot 1,5}{100} = 0,052 \text{ мг/дм}^3.$$

Такая концентрация соответствует требованиям рыбохозяйственных водоемов.

С учетом объема (600 м³/пог. м) и массы (600 кг/пог. м) опоки, а также массы нефтепродуктов (133 г/пог. м/год), на-

ходящихся в истинно растворенном состоянии и поступающих на фильтрующую полосу, срок службы опоки составит

$$T_{\text{оп}} = \frac{5 \cdot 600}{133} = 22,5 \text{ года.}$$

Следует отметить, что нефтепродукты не являются консервативным веществом и в течение времени под воздействием нефтеразрушающей микрофлоры будут превращаться в нетоксичные вещества.

На основании выполненных расчетов срок службы фильтрующей полосы можно прогнозировать на 15–20 лет. Об исчерпании ее сорбционной способности будет свидетельствовать качество фильтрата из дренажных труб, предназначенных для отбора контрольных проб.

Проведенные рекогносцировочные расчеты показывают перспективность строительства фильтрующих полос в местах интенсивного загрязнения нефтепродуктами железнодорожного полотна.

В настоящее время нами ведутся исследования по изучению фильтрующих, сорбционных и ионообменных свойств материалов, которые должны войти в состав фильтрующей полосы, а также по ее конструктивному оформлению.

Литература

1. Асонов А. М., Кирина А. А. Мониторинговые исследования загрязненности почво-грунтов на железнодорожных станциях // Матер. VII междунар. симп. «Чистая вода России — 2005». Екатеринбург, 2005.
2. Асонов А. М., Ильясов О. Р. Водные ресурсы и проблема поверхностного стока // Транспорт Урала. 2004. № 2 (2). С. 20–30. ISSN 1815-9400.
3. Асонов А. М., Кирина А. А. Очистка поверхностного стока, сформированного на территории объектов железнодорожного транспорта, с использованием природных сорбентов // Транспорт Урала. 2006. № 4 (11). С. 18–22. ISSN 1815-9400.
4. Асонов А. М., Харлова А. С. Загрязненность поверхностного стока и почво-грунтов на территории станции Свердловск-Сортировочный // Матер. X междунар. симп. «Чистая вода России — 2008». Екатеринбург, 2008.
5. Агрегатопонные системы защиты природных водоисточников от загрязнения поверхностным стоком : отчет о НИР / УрГУПС ; рук. Асонов А. М. Екатеринбург, 2006.
6. Попов А. Н. Прогноз и регулирование качества поверхностных вод (на примере Урала) : автореф. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1995. 40 с.
7. Бондаренко В. В. Охрана водных объектов от загрязнения сточными водами и рассредоточенным стоком с помощью биоинженерных систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2000. 38 с.
8. Фитофильр для очистки сточных вод : пат. Российской Федерации.
9. Антипинский НПЗ. Второй пусковой комплекс. Развитие внутреннего железнодорожного транспорта : техн. отчет (поясн. записка) / ОАО «Уралгипротранс». Екатеринбург, 2012.
10. Алексеев М. И., Кургаев А. М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий : учеб. пособие. М. : Изд-во АСВ ; СПб. : СПбГАСУ, 2000. 352 с.
11. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М. : ЦНТП Госстроя СССР, 1986.
12. Разработка методических рекомендаций по защите водных объектов от загрязнения талым и дождевым стоком с селитебных территорий : отчет о НИР / РосНИИВХ ; рук. Асонов А. М. ; исполн. Одинцова Г. Я., Ильясов О. Р. Екатеринбург, 2001. 79 с.

References

1. Asonov A. M., Kirina A. A. Monitoringovye issledovaniya zagryaznennosti pochvo-gruntov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh [Monitoring studies of contamination of soils at railway stations] // Mater. VII mezhdunar. simp. «Chistaya voda Rossii — 2005». Ekaterinburg, 2005.
2. Asonov A. M., Ilyasov O. R. Vodnye resursy i problema poverkhnostnogo stoka [Water resources and the problem of surface runoff] // Transport of the Urals. 2004. № 2 (2). S. 20–30. ISSN 1815-9400.
3. Asonov A. M., Kirina A. A. Ochistka poverkhnostnogo stoka, sformirovannogo na teritorii obyektov zheleznodorozhnogo transporta, s ispolzovaniem prirodnikh sorbentov [Cleaning of surface runoff generated on the territory of railway facilities using natural sorbents] // Transport of the Urals. 2006. № 4 (11). S. 18–22. ISSN 1815-9400.
4. Asonov A. M., Kharlava A. S. Zagryaznennost poverkhnostnogo stoka i pochvo-gruntov na territorii stantsii Sverdlovsk-Sortirovochny [Contamination of surface runoff and soil at station Sverdlovsk-Sortirovochny] // Mater. X mezhdunar. simp. «Chistaya voda Rossii — 2008». Ekaterinburg, 2008.
5. Agregatoponne sistemy zashchity prirodnikh vodoistochnikov ot zagryazneniya poverkhnostnym stokom : otchet o NIR [Aggregateless protection of natural water sources from pollution from runoff : research report] / USURT ; ruk. Asonov A. M. Ekaterinburg, 2006.
6. Popov A. N. Prognoz i regulirovanie kachestva poverkhnostnykh vod (na primere Urala) [Forecast and control of surface water quality (by the example of the Urals)] : avtoref. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 1995. 40 s.
7. Bondarenko V. V. Okhrana vodnykh obyektov ot zagryazneniya stochnymi vodami i rassredotochenym stokom s pomoshchyu bioizhenernykh system [Protection of water bodies from pollution from waste water and dispersed runoff using bioengineered systems] : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2000. 38 s.
8. Fitofiltr dlya ochistki stochnykh vod [Phytofilter for wastewater treatment] : pat. Rossiyskaya Federatsiya.
9. Antipinsky NPZ. Vtoroy puskovoy kompleks. Razvitiye vnutrennego zheleznodorozhnogo transporta : tekhn. otchet (poyasn. zapiska) [Antipinsky refinery. Second launch facility. Development of domestic rail transport : technical report (memorandum)] / OAO «Uralgiprotrans». Ekaterinburg, 2012.
10. Alexeyev M. I., Kurgaev A. M. Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhddevogo i talogo) stoka s urbanizirovannykh territoriy : ucheb. posobie [Organization of diversion of surface (rain and melted) runoff from urbanized areas : a textbook]. M. : Izd-vo ASV ; Spb. : SPbGASU, 2000. 352 s.
11. SNiP 2.04.03-85. Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya [SNIP 2.04.03-85. Sewerage. External networks and facilities]. M. : TsNTP Gosstroja SSSR, 1986.
12. Razrabotka metodicheskikh rekomendatsiy po zashchite vodnykh obyektov ot zagryazneniya talym i dozhddevym stokom s selitebnykh territoriy : otchet o NIR [Development of guidelines for the protection of water bodies from pollution with snowmelt and rainfall runoff from residential areas : research report] / RosNIIVKh ; ruk. Asonov A. M. ; ispoln. Odintsova G. Ya., Ilyasov O. R. Ekaterinburg, 2001. 79 s.

УДК 625.142.2.002.8

Вячеслав Яковлевич Бершадский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

О НАПРАВЛЕНИЯХ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ШПАЛ

Vyacheslav Yakovlevich Bershadsky, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Technospheric Safety, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Ways to solve the environmental problem of using railway sleepers

Аннотация

По методике оценки жизненного цикла для выявления наилучшей доступной технологии использования железнодорожных шпал проведено технико-экономическое сравнение альтернативных вариантов и предложены направления модернизации шпал.

Ключевые слова: железнодорожная шпала, оценка жизненного цикла, экологическая безопасность на транспорте, наилучшие доступные технологии, утилизация отработанных шпал.

Summary

According to the method of life cycle assessment to identify the best available technologies of use of railway sleepers, a feasibility comparison of the alternatives has been conducted and areas to of modernization of sleepers have been proposed.

Keywords: railway sleepers, life cycle assessment, environmental safety in transport, best available technology, disposal of waste sleepers.

Изменения в российском природоохранном законодательстве с переходом экологического нормирования воздействий на окружающую среду на принцип наилучших доступных технологий (НДТ) актуализирует работу по их выявлению, а также по формированию информационно-технических справочников НДТ для различных отраслей экономики [1].

В целях повышения экологической безопасности железнодорожного транспорта и определения направлений технической модернизации железнодорожных путей проведение такой работы в отношении использования железнодорожных шпал представляет определенный интерес [2, 3].

Актуальность и важность работы обусловлены серьезной экологической проблемой железнодорожного комплекса страны, связанной с утилизацией отработанных железнодорожных шпал: при значительных объемах образования этих опасных отходов (ежегодно в ОАО «РЖД» образуется более 210 тыс. т или 3,0 млн шт., накоплено более 500 тыс. т) их производство, утилизация или вторичное использование требуют применения экологически чистых технологий, а временное безопасное хранение на специализированных полигонах — крупных эксплуатационных затрат (только экологические платежи ОАО составляют ежегодно около 65 млн руб. исходя из сегодняшнего тарифа на размещение отходов III класса опасности 1288,2 руб./т).

Вместе с этим в связи с модернизацией и развитием инфраструктуры транспортного комплекса России увеличивается потребность в шпалах. Так, для сооружения 1 км железнодорожного пути проектируемой высокоскоростной магистрали (ВСМ) Москва — Екатеринбург в случае применения деревянных шпал потребуется 2,0 тыс. шпал, для изготовления которых необходимо 4 га строевого леса диаметром 26–28 см, возрастом 80–100 лет.

Проблема может быть решена достижением положительных результатов при проведении работ в следующих направлениях:

— применение экологически безопасных материалов, способов их обработки при производстве шпал, а также их конструкций, которые позволят увеличить срок службы продукции при снижении ее себестоимости;

— разработка экологически безопасных и ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных шпал.

ЦЕЛЬ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.

ПЛАНИРУЕМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Цель настоящего исследования — на основе экспертной оценки данных об эффективности используемых технологий, экологических аспектах их воздействия на окружающую среду и здоровье человека обосновать выбор НДТ в цикле обращения шпалы и выработать предложения по направлениям перспективного развития ее модернизации.

В качестве методов исследования принятые методики оценки жизненного цикла продукции (ОЖЦ) [4] и определения НДТ при сжигании отходов I–IV классов экологической опасности [5].

Предмет исследования — железнодорожные шпалы для широкой колеи по ГОСТ 78-2004 и ГОСТ 10629-88.

С помощью метода ОЖЦ на основе описания технологических процессов, оценки и инвентаризации показателей энергоресурсосбережения, а также уровня потенциальных воздействий на окружающую среду и здоровье человека на протяжении всего жизненного цикла шпалы (т.е. от приобретения сырья до производства, эксплуатации и утилизации) проведено сравнение эффективности применяемых технологий и дана экологическая оценка их преимуществ.

С использованием методологии определения НДТ [5] и данных Европейского справочника по НДТ по сжиганию отходов [6], а также сведений о развитии железнодорожной отрасли, о новейших направлениях перспективных разработок в сфере путевого хозяйства могут быть даны предложения по выбору НДТ.

Конечным планируемым результатом работы представляется обобщение имеющейся информации для подготовки отраслевого справочника НДТ.

НАЗНАЧЕНИЕ ШПАЛ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Шпалы (подрельсовые опоры) выполняют следующие функции [7]:

- воспринимают вертикальные, боковые и продольные усилия от рельсов и передают их на балластный слой;

- обеспечивают стабильность ширины рельсовой колеи, подуклонки рельсовых нитей и их электрическую изоляцию друг от друга на участках с автоблокировкой;

- обеспечивают совместно с балластным слоем грунта стабильное пространственное положение рельсовой колеи в плане и профиле.

Шпалы должны обладать:

- прочностью, износостойкостью и долговечностью в условиях переменных силовых и природно-климатических воздействий (атмосферные осадки, колебания температуры, сезонное замерзание-оттаивание);

- высокой сопротивляемостью к продольным и поперечным смещениям опор в балласте;

- механической прочностью, упругостью и диэлектрическими свойствами применяемых конструкционных материалов;

- дешевизной, недефицитностью, технологичностью в масштабном производстве;

- безопасностью при изготовлении, эксплуатации, утилизации (безвредность, экологичность, шумовибропоглощаемость, пожаробезопасность).

Таблица 1

Основные виды шпал, материалы, достоинства и недостатки

Вид шпал	Применяемый материал	Характеристики				Достоинства	Недостатки
		Плотность, кг/м ³	Срок службы, лет	Теплосодержание, МДж/шт.	Цена, руб.		
Шпалы деревянные пропитанные, ГОСТ 78-2004 (сорт 1, 2)	Древесина (сосна, ель, пихта, лиственница, береза, кедр, бук)	400–700 (при влажности $W = 12\%$)	До 20	970 ($W = 15\%$)	600–800	Упругие, прочные, легкие при обработке, хорошее сцепление со щебнем, малая чувствительность к ударам и колебаниям температуры, сравнительно небольшая масса (70 кг)	Небольшой срок службы из-за гниения, растрескивания и механического износа (в среднем до 15 лет), большой расход древесины, неоднородность упругих свойств пути по длине шпалы, вредность при обращении и проблемы утилизации (стоимость утилизации 5–25 \$ США за шпалу)
Шпалы железобетонные, ГОСТ 10629-88	Железобетон	2500	До 50	—	1500–1800	Прочность, долгий срок службы	Высокая стоимость, вес (масса 250–265 кг), жесткость, хрупкость на морозе, электропроводность, выброшумопроводимость, проблемы механической разделки при утилизации
Шпалы пластмассовые	Вторичные пластики	Применяются и имеют перспективы развития в США, Японии. По сравнению с деревянными обладают самыми высокими показателями по экологичности, сроку службы (более 50 лет), диэлектрическим свойствам, механической прочности. Цена применяемой полимерной шпалы из вторичного пластика ПЭНД-ПВ не превышает 1800 руб./шт.					
Шпалы металлические	Металл	На отечественных железных дорогах не применяются из-за очевидных недостатков — высокой стоимости, подверженности коррозии, электрической проводимости, шумопроводимости					

ПРИМЕНЯЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

В табл. 1 приведены известные сведения о применяемых для изготовления железнодорожных шпал материалах, достоинствах и недостатках основных видов шпал.

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что пропитанные антисептиком деревянные и железобетонные шпалы, чаще всего применяемые в отечественном железнодорожном комплексе, сопоставимы по эксплуатационным показателям качества: более высокая стоимость железобетонных шпал компенсируется сроком их использования. Конкурентное преимущество железобетонных шпал — их экологичность и относительная безвредность производства. Однако они уступают деревянным по таким важным показателям, как упругость, шумовибропоглощаемость, механическая прочность в циклах «замерзание-оттаивание». Следует отметить, что в настоящее время на железных дорогах России и ближнего зарубежья доля деревянных шпал составляет до 75 %.

Известна и практика применения шпал из полимерных материалов (в США, Японии). Более высокие, чем у деревянных или железобетонных шпал, эксплуатационные и безопасные свойства и сравнимая себестоимость свидетельствуют о конкурентоспособности и перспективности использования шпал из полимерных материалов.

Несомненный интерес представляет разработка и использование композиционных шпал, содержащих древесину и полимерные материалы.

ПРОПИТКА ШПАЛ АНТИСЕПТИКАМИ

Для предохранения древесины от гниения и увеличения тем самым срока эксплуатации шпал их подвергают пропитке антисептиками. Наиболее надежный способ обработки — метод «вакуум — давление — вакуум» в автоклавах высокого давления с последующей фиксацией раствора в структуре дерева [8, 9].

Антисептики должны отвечать следующим требованиям: быть высокотоксичными для разрушающих древесину грибков и насекомых и одновременно безопасными при изготовлении, эксплуатации и утилизации; иметь высокую проникающую способность; сохранять свои свойства длительное время; не вымываться атмосферными осадками; не понижать физико-механические свойства древесины и не коррозировать металлические детали, с которыми соприкасается пропитанная древесина; быть доступными и дешевыми.

Для пропитки шпал используются антисептики, которые делятся на два класса: органические на основе углеводородов (масляные) и водорастворимые, содержащие соли металлов.

Традиционно применяется каменноугольное масло (креозот) — продукт ректификации каменноугольной смолы, представляющий собой, как правило, смесь поглотительной ($T_{кип} = 230-280^{\circ}\text{C}$) и первой антраценовой ($T_{кип} = 280-320^{\circ}\text{C}$) фракций [10]. В состав креозотового масла входят в основном (до 75 %) циклические ароматические углеводороды вида C_nH_m (нафталин C_{10}H_8 и его гомологи, аценафтен C_{12}H_9 , флуорен C_{13}H_9 , антрацен $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, фенантрен $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ и др.), фенолы $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, алифатические и ароматические кетоны. В незначительных количествах содержатся сернистые и азотистые соединения,

бенз(а)пирен, а также (около 25 % мас.) высококипящие компоненты, не перегоняемые при температуре выше 316°C .

Входящие в состав органические соединения обладают высоким токсическим, а бенз(а)пирен — канцерогенным действием, поэтому многие из них относятся к веществам первого (чрезвычайно опасные) и второго (особо опасные) класса опасности. Предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны для таких веществ, как бенз(а)пирен, пирен, антрацен, фенол, составляют соответственно 0,05; 0,03; 0,15; 0,3 мг/м³ [11]. Шпалопропиточные заводы относятся к вредным (класс вредности 3.1), пожароопасным производствам и оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду. В странах ЕС креозот, как особо опасный продукт, отнесенный к классу канцерогенов, с 2003 г. полностью запрещен к применению.

При термическом разложении составляющих креозота веществ в отсутствие кислорода образуется спектр углеводородов с содержанием $\text{CH}_4 \sim 10-12\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 \sim 15-20\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 \sim 10-11\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} \sim 20-30\%$. Необходимым условием экологически безопасной и термической утилизации таких веществ является их разложение до стабильных соединений (CO , CO_2 , H_2 , CH_4) и полное сжигание последних при высокой температуре с последующей «закалкой» отходящих газов. Наименьшая теплота сгорания креозота 37,5–40,0 МДж/кг, вещество является пожароопасным материалом.

К водорастворимым антисептикам [12], обладающим высокими фунгицидными и инсектицидными свойствами, принадлежат препараты группы ССА (название по основным компонентам консерванта: Си — медь, Ср — хром, Ас — мышьяк). К ним относятся отечественные торговые марки «УЛТАН» и «Элемсепт» (класс токсичности 3). Отметим, что концентрированные составы антисептиков группы ССА представляют собой большую опасность для человека, поскольку содержат высокотоксичный мышьяк и шестивалентный хром. При сжигании пропитанной ССА древесины из соединений мышьяка выделяется ядовитый газ арсин, а в золе остается большое количество мышьяка. В настоящее время антисептики группы ССА запрещены к использованию в ЕС, а также в США, Канаде, Австралии, Японии и ряде других стран. Тем не менее, соединения хрома и меди (СС) пока еще широко используются в России и США. Применяют также для защиты древесины соли фтористоводородной кислоты (фтористый и кремнефтористый натрий), медный купорос.

В качестве альтернативы ССА за рубежом разработаны антисептики на основе меди и триазолов, относящиеся к 4-му классу токсичности и предназначенные для автоклавной пропитки древесины (например, товарная марка «Таналит®Е»).

В табл. 2 приведены сравнительные данные по характеристикам шпал, пропитанных в автоклаве по ГОСТ 20022.5-93 креозотом и препаратом «Элемсепт».

Препарат «Элемсепт» имеет ряд преимуществ перед креозотом: при его использовании увеличивается срок службы деревянных шпал по крайней мере в 2 раза (сопоставим со сроком эксплуатации железобетонной шпалы), не нарушается структура древесины, что сохраняет ее механические свойства, за счет низкой влажности после пропитки повышаются диэлектрические свойства, снижается класс опасности производства

и экологический класс опасности отходов, пропитка не подвержена вымыванию и шпала не намокает, отвечает свойствам пожаробезопасности. При сжигании шпал, пропитанных неорганическими реагентами, следует предполагать повышение уровня экологической безопасности оборудования.

Вместе с тем сравнение рыночных цен на антисептики позволяет судить о том, что цена готовой продукции (пропитанной шпалы) практически не зависит от стоимости пропиточного материала.

Таблица 2

**Показатели железнодорожных шпал,
пропитанных антисептиками**

Показатель	«Элемсепт», марка А	Каменно-угольное масло
Предельно допустимая концентрация в рабочей зоне (ПДК _{р.з.}), мг/м ³	—	1,5·10 ⁻³
Температура вспышки, °С	Не горюч	100–110
Температура воспламенения, °С		150
Температура самовоспламенения, °С		0т 540
Класс экологической опасности	4	3
Класс токсичности	3	2
Период вымывания, лет	Не вымывается	7
Исходная влажность перед пропиткой, % мас.	До 90	25
Поглощение защитного средства: кг/м ³ в расчете на шпалу, кг	6–8 0,8–1,0	85–105 11–14
Намокание	Отсутствует	По мере вымывания
Рекомендуемый срок службы, лет	40–45	15–20
Средняя цена на реагент, руб./кг	20	14

Следует считать применение указанных водорастворимых антисептиков как НДТ.

Очевидно, что разработка новых, более эффективных средств защиты древесины и технологий обработки шпал является перспективным направлением.

ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ШПАЛ

Из известных методов утилизации деревянных шпал исходя из специфики отрасли, свойств отходов, объемов их образования, а также необходимости решения вопросов экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения следует рассматривать только методы термического обезвреживания. Такие методы позволяют использовать шпалу как эффективный для получения вторичный ресурс (одна деревянная шпала содержит количество тепловой энергии, приблизительно равное 1,0 тыс. МДж или 0,24 Гкал, в то время как тариф на тепловую энергию, отпускаемую потребителям в централизованных тепловых сетях, составляет 1400 руб./Гкал, т.е. энергия, заключенная в шпale, сравнима по стоимости с ценой на новую шпалу), который наиболее целесообразно применять при генерации тепла для собственных нужд. Причем эти способы в соответствии с действующим законодательством [13, 14] могут быть реали-

зованы только на специальном оборудовании при соблюдении экологически контролируемых безопасных условий сжигания.

Технические данные, полученные из литературных источников [15–19] и в результате проведенных оценочных расчетов, характеризующие известные термические методы утилизации железнодорожных шпал, приведены в табл. 3.

В табл. 4 представлены требования к отходящим газам теплоэнергетических установок согласно Директиве 96/61/ЕС «О комплексном предупреждении и контроле за загрязнениями», определяющей нормы экологической безопасности, в том числе при сжигании отходов, в странах Евросоюза [20]. Для сравнения приведена характеристика российской установки ИН 50.5, предназначеннной для утилизации шпал [21].

Метод прямого сжигания древесины в качестве топлива получил широкое распространение как в быту, так и в промышленности для получения тепловой энергии. Его преимущество — простота аппаратурного оформления, недостатки — низкие показатели энергетической и экологической эффективности. Тепловые агрегаты (котлы, топки, котельные), в которых топливом служат древесина и отходы ее обработки, не оснащенные, как правило, даже примитивными газоочистными установками, являются источниками загрязнения окружающей среды. Низкое качество технологии с точки зрения экологической безопасности обусловлено физико-химическими особенностями процесса. Полное сгорание углеводородов в реальных теплоагрегатах может быть обеспечено только при значительном избытке воздуха. Увеличение его расхода приводит к существенному снижению тепловой эффективности, температуры процесса и, следовательно, к образованию стойких и особо опасных органических соединений (монооксид углерода, бенз(а)пирен, альдегиды, акролеин, полициклические ароматические углеводороды, сажа и др.), подавление которых в соответствии с современными требованиями экологической безопасности влечет за собой техническое усложнение аппаратурного оформления газоочистных установок и рост капитальных затрат на их сооружение (более 30 % от стоимости всего оборудования). Процесс труднорегулируемый, плохо поддается автоматизации.

Метод пиролиза, используемый, как правило, для получения продуктов лесохимии (древесный уголь, смола, уксусная кислота) — эффективный, безопасный, хорошо изученный, научно и технически обоснованный, реализуется в промышленности. Однако его применение для утилизации шпал не отвечает цели и задачам решения обозначенной проблемы в железнодорожной отрасли.

Наиболее перспективным направлением является разработка, проектирование и эксплуатация производственных комплексов, установок и оборудования с использованием метода газификации отработанных шпал. Его преимущества — высокая энергетическая эффективность (тепловой КПД 85–95 %), экологическая безопасность (полное уничтожение отходов при минимальном воздействии на окружающую среду), универсальность (термическое обезвреживание всех загрязненных нефтепродуктами отходов), возможность полной управляемости процессом и его автоматизации. Недостатками метода являются техническая сложность и значительная капиталоемкость при сооружении установок.

Таблица 3

Технологические процессы утилизации деревянных непропитанных шпал термическим методом

Характеристика, параметры и показатели процесса	Прямое сжигание в слое	Пиролиз (сухая перегонка)	Газификация (прямой процесс с воздушным дутьем)
1. Топливо	Древесина Элементный состав (в расчете на сухое), % мас.: 50% C; 6% H; 43% O; <1% S; 0,2% N. Влажность, % мас.: $W = 15\text{--}20$		
2. Физико-химические основы процесса	Экзотермическая реакция окисления кислородом воздуха элементов топлива	Экзотермическая термодеструкция гемицеллюлозы (200–260°C), целлюлозы (240–350°C) и лигнина (250–400°C) без доступа окислителя	Высокотемпературное (600–1100°C) превращение углеводородов топлива при нормальном или повышенном давлении при ограниченном доступе окислителя (кислород, воздух, водяной пар, диоксид углерода) в газ (генераторный газ) с его последующим окислением (900–1500°C) до CO ₂ и H ₂ O
3. Продукты (при полном сгорании), кг/кг	1. Газообразные: CO ₂ — 1,64, H ₂ O — 0,11 2. Твердые (зола) — до 0,01	1. Твердые (древесный уголь) — 24–25 2. Жидкие: уксусная кислота и гомологи — 6–9 альдегиды, кетоны, эфиры — 5–6 древесная смола — 4,5–14 вода — 67–81 3. Газообразные (неконденсируемые газы) — 22–23, в том числе (% об.): диоксид углерода — 45–55 монооксид углерода — 28–32 водород — 1–2 метан (CH ₄) — 8–21 углеводороды (C _n H _m) — 1,5–8 Низшая теплота сгорания газов — 3,5–15,2 МДж/m ³	Генераторный газ состава, % об: CO — 12–30; H ₂ — 10–25; CH ₄ — 0,5–5; N ₂ — 35–55; CO ₂ — 8–15; H ₂ O — 2–20; C _n H _m < 1,0 Теплота сгорания (низшая) — 4,2–6,7 МДж/m ³ (5,0–8,0 МДж/кг) Объем генераторного газа — 1,8–2,2 м ³ газообразные продукты сжигания: CO ₂ — 1,64, H ₂ O — 0,11 Минеральный остаток (зола) — до 1,0% мас.
4. Параметры процесса:			
температура, °C	2000 (при $\alpha = 1$) 800–1100 (при $\alpha = 2\text{--}3$)	450–500	В камере газификации — 850–1000 В камере дожигания — 1250–1300
расход воздуха, м ³ /кг ($\alpha = 1$)	4,2–4,6	—	На газификацию — 1,5 На дожигание — 2,8
объем отходящих газов, м ³ /кг	4,4–4,5 (при $\alpha = 1$) 8,5–13,5 (при $\alpha = 2\text{--}3$)	0,13–0,15	4,5–5,0
5. Показатели процесса:			
тепловой КПД, %	до 60	80–90	85–95
состав отходящих газов, м ³ /кг			
балласт:			
CO ₂	0,74	0,075	0,74
H ₂ O	0,75	—	0,75
N ₂	3,3–3,5	—	3,3–3,5
O ₂	0–1,0	—	0,05
примеси: CO, C _n H _m , NO _x , SO _x	Образуются в зависимости от химического состава топлива, технологических параметров процесса, его аппаратурного оформления		
6. Газоочистка	Очистка твердого (циклоны, рукавные фильтры), подавление CO, C _n H _m , SO ₂ , NO _x (скруббер, адсорбер)	Подавление CO, C _n H _m , H ₂ , SO ₂ , NO _x (дожигание, каталитическое окисление, скруббер, адсорбер)	Очистка твердого (циклоны, рукавные фильтры), подавление CO, C _n H _m , SO ₂ , NO _x (скруббер, адсорбер, катализ)
Достоинства	Низкая стоимость вырабатываемой энергии, простота оборудования	Возможность получения продуктов лесохимии (древесные уголь, смола)	По сравнению с прямым сжиганием универсален, обладает высоким КПД (85–90%), автоматизируется, экологически наиболее безопасен
Недостатки	Повышенный расход воздуха, жесткие требования к влажности сырья (не более 12%), низкий тепловой КПД (20–60%), трудность регулирования и автоматизации, большие затраты на экологическую безопасность	Нецелесообразно использовать в локальных установках утилизации древесных отходов	Технически сложен в аппаратурном оформлении, значительные капитальные затраты

Таблица 4

Нормы эмиссии загрязняющих веществ при сжигании топлива (требуемый тепловой КПД 60–80 %)

Страна	Мощность теплоагрегата, МВт	Содержание твердых веществ в выбросах в атмосферу, мг/м ³			
		Твердые частицы	CO	NO _x	SO _x
Чехия	0,2–5,0	250	250	650	2500
	5–50	150	250	650	2500
Германия	0,5–1,0	150	500	—	—
	1–5	150	250	500	2000
Австрия	3–5	120	250	300	—
Россия, установка ИН 50.5 «Турмалин», КПД 80–85 %	2,25	30	50	50	60

Процесс газификации, для которого характерно большое разнообразие технологических режимов и конструктивного исполнения оборудования, заключается в высокотемпературном термохимическом превращении органического топлива в горючий газ в условиях недостатка (33–35 % от теоретически необходимого для полного сгорания) окислителя. Под действием высокой температуры (600–1000°C) происходит расщепление углеводородов до низкомолекулярных соединений или элементарных веществ, составляющих горючий газ (режим газогенерации). Далее генераторный газ подвергается окислению (для наиболее полного использования химической теплоты горючей смеси необходима организация вторичного дутья в количестве около 20–30 % от общего расхода воздуха, подаваемого на горение) при высокой температуре (до 1500°C) и стабилизации образовавшихся продуктов (CO₂ и H₂O) резким охлаждением. Этот метод позволяет обеспечить при сравнительно небольшом расходе воздуха полное сгорание углерода и предотвратить образование опасных углеродсодержащих химических соединений, что подтверждает его экологическую эффективность.

Следует отметить, что накопленные к настоящему времени знания о физико-химических закономерностях процессов и явлений, практика применения метода газификации в промышленных и опытных установках, результаты теоретических и экспериментальных работ по утилизации шпал позволяют производить необходимые расчеты и разрабатывать эффективное оборудование.

В работах [22, 23] приведен сравнительный анализ технических характеристик установок по термической утилизации железнодорожных шпал. Из сравнения данных следует, что установки, работающие на принципах метода газификации, обладают очевидными преимуществами.

На рис. 1 [21] показана принципиальная технологическая схема универсального высокотехнологического комплекса (УВК), разработанного ЗАО «Турмалин» (прототип — инсинератор ИН 50.5) и предназначенного для термического обезвреживания опасных отходов, в том числе шпал.

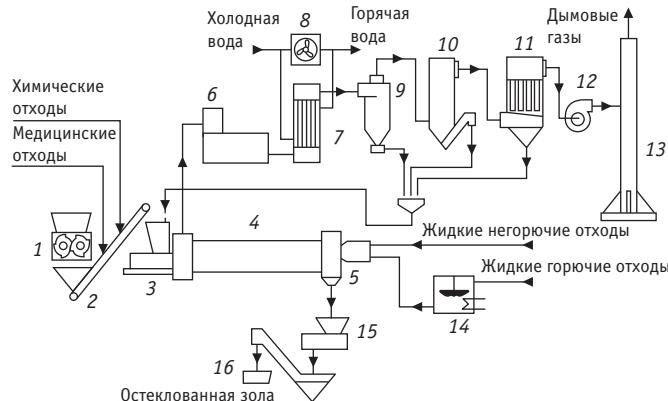


Рис. 1. Универсальный высокопроизводительный комплекс:

- 1 — шредер; 2 — транспортер; 3 — загрузочное устройство;
- 4 — барабанная печь; 5 — циклонно-вихревая топка;
- 6 — камера дожигания; 7 — теплообменник;
- 8 — аппарат воздушного охлаждения; 9 — циклон; 10 — скруббер;
- 11 — рукавный фильтр-адсорбер; 12 — дымосос;
- 13 — дымовая труба; 14 — емкость подготовки нефтешламов;
- 15 — плазменный остекловыватель; 16 — контейнер для золы

Метод газификации шпал, реализованный на этой установке, следует рассматривать как НДТ.

Технология переработки железобетонных шпал сводится к механическому дроблению шпал, отделению металла от бетона и вторичному использованию образующихся отходов в металлургии и строительстве. Разработан и эксплуатируется комплекс КУШ-40 годовой производительностью 80 тыс. шт. при работе в одну смену.

РАЗРАБОТКА ШПАЛ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для увеличения срока эксплуатации шпал и уменьшения загрязнения окружающей среды при их утилизации в Уральском государственном университете путей сообщения предложена [24] составная композиционная шпала, состоящая из деревянного бруса (основной несущий элемент конструкции, его объем составляет 93–97 % от общего объема шпалы), заключенного в герметично прилегающий корпус из вторично-го пластика, имеющий снаружи форму поперечного сечения и геометрические размеры стандартной деревянной шпалы. Такое решение, сохранив положительные свойства деревянной шпалы, позволяет защитить деревянный брус от контакта с влагой и кислородом, что предотвращает его от гниения и увеличивает срок службы изделия без использования опасных антисептиков, а также упрощает и делает безопасной технологию утилизации отработанной шпалы (полимерная оболочка вскрывается механическим способом, полученные отходы — древесина и полимеры — полностью используются как вторичные ресурсы).

Организация НИОКР, направленных на разработку и внедрение предлагаемой технологии применения железнодорожной шпалы, безусловно, представляющей собой НДТ, является приоритетной и перспективной задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что накоплен значительный потенциал знаний для разработки и широкого внедрения технологий, обеспечивающих экологическую безопасность при использовании железнодорожных шпал.

Разработка и применение вместо каменноугольного масла эффективных и безопасных антисептиков при пропитке деревянных шпал дает возможность увеличить срок их жизненного цикла до 50 лет, что сравнимо со сроком эксплуатации железобетонных шпал.

Перспективным направлением исследований для создания экологически чистых шпал следует считать разработку конструкций и технологий утилизации шпал из композиционных (древесина и вторичные полимеры) материалов.

Проектирование и сооружение локальных комплексов утилизации деревянных шпал методом газификации позволит решить проблему переработки накопленных и вновь образующихся опасных отходов, сэкономить в России до 0,5 МВт электроэнергии и получить 0,4 Гкал тепла с каждой тонны отходов при соблюдении требований по охране атмосферного воздуха ниже норм стран ЕС.

Литература

1. О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды и отдельные законодательные акты Российской Федерации» : проект федер. закона № 584587-5 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=PRJ; n=90289> (дата обращения: 10.04.2014).
2. Экологическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2015 года и перспективу до 2030 года / утв. распоряжением ОАО «РЖД» 13.02.09 № 293р [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3863 (дата обращения: 10.04.2014).
3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997 (дата обращения: 10.04.2014).
4. ГОСТ Р ИСО 14040-1999. Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. М. : Госстандарт России, 2000.
5. ГОСТ Р 54205-2010. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности при сжигании. М. : Стандартинформ, 2011.
6. Европейская комиссия. Комплексное предупреждение и контроль загрязнений. Справочное руководство по НДТ. Сжигание отходов. 2006. Авг.
7. Железнодорожный путь : учебник для вузов / А. М. Никонов, Б. И. Гасанов, Б. Э. Глюзберг ; под ред. Е. С. Ашиза. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. 544 с.
8. ГОСТ 20022.5-1993. Защита древесины. Автоклавная пропитка маслянистыми защитными средствами. М. : Стандартинформ, 1999.
9. Технология производства [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rshpz.ru/technical-support/types-and-methods-of-impregnation.htm> (дата обращения: 10.04.2014).
10. ГОСТ 2770-1974. Масло каменноугольное для пропитки древесины. М. : Госстандарт, 1974.
11. Лазарев Н. В. Вредные вещества в промышленности : справочник для химиков, инженеров и врачей. Л. : Химия, 1976.
12. Древесина и способы пропитки ее антисептиками [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rshpz.ru/technical-support/types-and-methods-of-impregnation.htm> (дата обращения: 10.04.2014).

References

1. О внесении изменений в Federalny zakon «Ob okhrane okruzhayushchey sredy i otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii» : proekt feder. zakona № 584587-5 [On Amending the Federal Law «On Environmental Protection and Certain Legislative Acts of the Russian Federation» : draft Federal Law No. 584587-5]. [Electronic resource]. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=PRJ; n=90289> (date accessed: 10.04.2014).
2. Ekologicheskaya strategiya OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i perspektivu do 2030 goda [Environmental Strategy of JSC Russian Railways for the period up to 2015 and the prospect of up to 2030] / utv. rasporyazheniem OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» 13.02.09 № 293r [Electronic resource]. URL: http://doc.rzd.ru/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3863 (date accessed: 10.04.2014).
3. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda [Strategy for the development of rail transport in the Russian Federation up to 2030]. [Electronic resource]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997 (date accessed: 10.04.2014).
4. GOST R ISO 14040-1999. Upravlenie okruzhayushchey sredoy. Otsenka zhiznennogo tsikla. Printsipy i struktura [GOST R ISO 14040-1999. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and structure]. M. : Gosstandart Rossii, 2000.
5. GOST R 54205-2010. Resursosberezenie. Obrashchenie s otkhodami. Nailuchshee dostupnye tekhnologii povysheniya energoeffektivnosti pri szhiganiyu [GOST R 54205-2010. Resource conservation. Waste management. Best available technology to improve energy efficiency in burning]. M. : Standartinform, 2011.
6. Evropeyskaya komissiya. Kompleksnoe preduprezhdenie i kontrol zagryazneniy. Spravochnoe rukovodstvo po NDT. Szhiganie otkhodov [European Commission. Integrated pollution prevention and control. BAT Reference. Waste incineration]. 2006. Avg.
7. Zheleznodorozhny put : uchebnik dlya vuzov [Rail track : a textbook for universities] / A. M. Nikonorov, B. I. Gasanov, B. Ye. Glyuberg ; pod red. Ye. S. Ashiza. M. : Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. 544 s.
8. GOST 20022.5-1993. Zashchita drevesiny. Avtoklavnaya propitka maslyanistyimi zashchitnymi sredstvami [GOST 20022.5-1993. Protection of wood. Autoclave impregnation with oily protective agents]. M. : Standartinform, 1999.
9. Tekhnologiya proizvodstva [Production technology]. [Electronic resource]. URL: <http://www.rshpz.ru/technical-support/types-and-methods-of-impregnation.htm> (date accessed: 10.04.2014).
10. GOST 2770-1974. Maslo kamennougolnoe dlya propitki drevesiny. [GOST 2770-1974. Coal-tar oil for wood impregnation]. M. : Gosstandart, 1974.
11. Lazarev N. V. Vrednye veshchestva v promyshlennosti : spravochnik dlya khimikov, inzhenerov i vrachey [Harmful substances in industry : guide for chemists, engineers, and doctors]. L. : Khimiya, 1976.

13. Об охране атмосферного воздуха : Федер. закон от 04.05.99 № 96-ФЗ (с изменениями) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150000/ (дата обращения: 10.04.2014).
14. Правила пожарного режима в Российской Федерации / утв. Постановлением Правительства РФ от 25.04.12 № 390 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/18451.html> (дата обращения: 10.04.2014).
15. Теория сжигания древесины // Лес и бизнес : электрон. журн. 2005. № 6 (16). URL: http://kotellux.ru/news/news_807.htm (дата обращения: 10.04.2014).
16. Лямин В. А. Газификация древесины. М., 1967. 260 с.
17. Гордон Л. В., Скворцов С. О., Лисов В. И. Технология и оборудование лесохимических производств. М. : Лесная промышленность, 1988. 360 с.
18. Донцов Д. П., Кочева М. А. Эффективное использование газогенераторных установок [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rae.ru/forum2012/313/2909> (дата обращения: 10.04.2014).
19. Использование древесной биомассы в энергетических целях : научный обзор. Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2008. ISBN 978-985-6823-53-7.
20. Европейская комиссия. Комплексное предотвращение и контроль загрязнений : справочное руководство по НДТ. Сжигание отходов. ЕС, 2006.
21. Кофман Д. И., Востриков М. М. Комплекс для термического уничтожения твердых и жидкых опасных отходов // Экология производства. 2009. Авг.
22. Бетонные элементы транспорта: Установки для утилизации деревянных шпал. Сравнительные характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.beteltrans/ru> (дата обращения: 10.04.2014).
23. Бетонные элементы транспорта: Шпалы. Проблема утилизации и методы ее решения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.beteltrans/ru> (дата обращения: 10.04.2014).
24. Составная композиционная шпала для железных дорог : решение о выдаче пат. Российской Федерации.
12. Drevesina i sposoby propitki ee antiseptikami [Wood and methods of wood impregnation with antisepsics]. [Electronic resource]. URL: <http://www.rshp.ru/technical-support/types-and-methods-of-impregnation.htm> (date accessed: 10.04.2014).
13. Ob okhrane atmosfernogo vozdukha : Feder. zakon ot 04.05.99 № 96-FZ (s izmeneniyami) [On Air Protection : Federal Law of 04.05.99 No. 96-FZ (as amended)]. [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150000/ (date accessed: 10.04.2014).
14. Pravila pozharnogo rezhima v Rossiyskoy Federatsii [Fire regime rules in the Russian Federation] / utv. Postanovleniem Pravitelstva RF ot 25.04.12 № 390 [Electronic resource]. URL: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/18451.html> (date accessed: 10.04.2014).
15. Teoriya szhiganiya drevesiny [The theory of wood burning] // Les i biznes : elektron. zhurn. 2005. № 6 (16). URL: http://kotellux.ru/news/news_807.htm (date accessed: 10.04.2014).
16. Lyamin V. A. Gazifikatsiya drevesiny [Gasification of wood]. M., 1967. 260 s.
17. Gordon L. V., Skvortsov S. O., Lisov V. I. Tekhnologiya i oborudovanie lesokhimicheskikh proizvodstv [Technology and equipment for wood chemical industry facilities]. M. : Lesnaya promyshlennost, 1988. 360 s.
18. Dontsov D. P., Kocheva M. A. Effektivnoe ispolzovanie gazogeneratornykh ustanovok [Efficient use of gas plants]. [Electronic resource]. URL: <http://www.rae.ru/forum2012/313/2909> (date accessed: 10.04.2014).
19. Ispolzovanie drevesnoy biomassy v energeticheskikh tselyakh : nauchny obzor [The use of woody biomass for energy purposes : scientific review]. Minsk : MGEU im. A. D. Sakharova, 2008. ISBN 978-985-6823-53-7.
20. Evropeyskaya komissiya. Kompleksnoe predotvraschenie i kontrol zagryazneniy : spravochnoe rukovodstvo po NDT. Szhiganie otkhodov [European Commission. Integrated pollution prevention and control : BAT Reference. Waste incineration]. EU, 2006.
21. Kofman D. I., Vostrikov M. M. Kompleks dlya termicheskogo unichtozheniya tverdykh i zhidkikh opasnnykh otkhodov [Complex for thermal destruction of solid and liquid hazardous waste] // Ekologiya proizvodstva. 2009. Avg.
22. Betonne elementy transporta: Ustanovki dlya utilizatsii derevyanniykh shpal. Sravnitelnye kharakteristiki [Concrete elements of transport: plants for the disposal of wooden sleepers. Comparative characteristics]. [Electronic resource]. URL: <http://www.beteltrans/ru> (date accessed: 10.04.2014).
23. Betonne elementy transporta: Shpaly. Problema utilizatsii i metody ee resheniya [Concrete elements of transport: railway sleepers. The problem of recycling and methods to solve it]. [Electronic resource]. URL: <http://www.beteltrans/ru> (date accessed: 10.04.2014).
24. Sostavnaya kompozitsionnaya shpala dlya zheleznykh dorog [Component composite sleepers for railways] : reshenie o vydache pat. Rossiyskaya Federatsiya.

УДК 629.113

Сергей Александрович Войнаш, аспирант кафедры «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института — филиала Алтайского государственного технического университета (РИИ АлтГТУ),
 Александр Станиславович Войнаш, доцент кафедры «Наземные транспортные системы» Рубцовского индустриального института — филиала Алтайского государственного технического университета (РИИ АлтГТУ),
 Александр Станиславович Демидов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ И МАНЕВРЕННОСТИ ФЕРМЕРСКОГО МАЛОТОННАЖНОГО ГРУЗОВИКА

Sergey Alexandrovich Voynash, graduate student, Department of Land Transport Systems, Rubtsovsk Industrial Institute — a branch of Altai State Technical University (RII AltSTU), Alexander Stanislavovich Voynash, Associate Professor, Department of Land Transport Systems, Rubtsovsk Industrial Institute — a branch of Altai State Technical University (RII AltSTU), Alexander Stanislavovich Demidov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Bridges and Tunnels, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Increasing of cross-country ability and maneuverability of farm light trucks

Аннотация

Рассмотрена конструкция, обеспечивающая проходимость по малосвязным грунтам. Для снижения затрат мощности при крутом повороте грузовика предложен автоматический подъем натяжного колеса отстающего борта (патент РФ на изобретение № 2441794). С целью аналитической оценки эффективности конструкции полугусеничного хода разработана методика определения потребной касательной силы тяги. Проведены сравнительные расчеты затрат мощности двигателя грузовика на повороты с различными радиусами при поднятом и опущенном натяжном колесе. Установлено, что подъем натяжного колеса отстающего борта позволяет не менее чем на 30 % увеличить предельную по условию мощности двигателя скорость входления фермерского грузовика в крутой поворот.

Ключевые слова: фермерский грузовик, проходимость, маневренность, полугусеничный ход, поворот, затраты мощности.

Summary

A design which provides mobility on low cohesion soils is considered. To reduce power requirement of truck at a sharp turn an automatic lift of idler of the lagging side is proposed (RF patent No. 2,441,794). In order to analyze the effectiveness of the semi-tracked design, a methodology has been developed for determination of required tangential traction. Comparative calculations of required truck engine power are performed for turns with different radii at elevated and retracted idler. It is found that the lift of the idler of the lagging side allows to improve by not less than 30 % the limit speed of farm truck in a sharp term as constrained by engine power.

Keywords: farm truck, cross-country capacity, manoeuvrability, semi-tracked design, turn, power input.

В последние десятилетия в Российской Федерации получили развитие малые формы хозяйствования — крестьянские (фермерские, КФХ) и личные подсобные хозяйства (ЛПХ). Количество первых составляет около 250 тыс., вторых — не менее 18 млн, в том числе 15,6 млн — на селе. На долю хозяйств малых форм приходится значительная доля (более 90%) объема производства овощей и картофеля.

Производственные процессы в КФХ и ЛПХ сопровождаются транспортировкой различных грузов: сельскохозяйственной продукции, удобрений, топлива, строительных материалов и т. п. Транспортные работы в КФХ и ЛПХ могут быть выполнены с использованием как собственной, так и арендованной техники. Анализ показал, что большую часть транспортных работ (до 60–70% объема) целесообразно выполнять на базе кратковременно арендованной большегрузной автотракторной техники: самосвалов типа КамАЗ или тракторов К-700 с прицепами. Это позволяет обеспечить транспортировку грузов в сжатые сроки и экономить трудовые ресурсы хозяйства. Остальная часть транспортной работы, что эквивалентно, например, для условий среднего КФХ перемещению примерно 1 т грузов ежедневно, требует применения таких транспортных средств, техническая характеристика которых формируется значением nominalной рейсовой нагрузки 900–1200 кг. Рядом организаций (НАМИ, МГАУ им. В. П. Горячкина и др.) проводятся работы по тематике малотоннажных грузовиков сельскохозяйственного назначения [1–3].

В ходе исследований, проведенных в РИИ АлтГТУ, был разработан, изготовлен и испытан в реальных эксплуатационных условиях фермерский малотоннажный грузовик ЭМ-0,6 с двигателем мощностью 21 кВт, оснащенный гидроуправляемым самосвальным кузовом и приспособлениями для самопогрузки [4–6]. Диапазон скоростей движения грузовика от 3,6

до 52,9 км/ч, при собственной массе 1800 кг его грузоподъемность достигает 1000 кг.

Значительный процент загрузки по времени использования фермерского грузовика приходится на движение в условиях, близких к бездорожью, по малосвязным грунтам. В зимний период при вывозке навоза, транспортировке кормов и на других работах грузовик движется по снежным дорогам, а зачастую и просто по снежной целине с достаточно большой высотой снежного покрова, ранней весной и поздней осенью движение осуществляется по слабым, водонасыщенным грунтам. Характерной особенностью работы фермерского грузовика является наличие при его движении крутых (т.е. с радиусом 4–6 м) поворотов в обе стороны.

С целью упрощения конструкции и повышения ее надежности на грузовике ЭМ-0,6 ведущим выполнен только один (задний) мост. Проходимость грузовика обеспечивается применением на переднем и заднем мостах колес большого диаметра и принудительной блокировкой дифференциала. В пиковые периоды может быть использована предложенная в РИИ АлтГТУ легкосъемная конструкция полугусеничного хода (ПГХ), позволяющая повысить проходимость за счет существенного снижения давления на грунт под ведущими колесами [4, 5, 7].

Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что при крутых поворотах колесных транспортных средств с ПГХ резко (не менее чем в 2–3 раза) возрастает мощность, потребная для движения, что ограничивает маневренность и должно быть учтено при разработке машин с двигателями малой мощности.

С целью снижения затрат мощности при крутом повороте фермерского грузовика было предложено [8] схемное решение по автоматическому подъему натяжного колеса ПГХ отставшего борта (рис. 1).

При прямолинейном движении грузовика гидрораспределители 11 располагаются в позиции, изображенной на рис. 1б, в которой их вторая и четвертая линии связаны друг с другом соединительной гидролинией. При этом насос 9 перекачивает рабочую жидкость на слив через клапан 10. Натяжные колеса 6, связанные через балансиры 7 со штоками гидроцилиндров 12, благодаря предварительному сжатию пружинных амортизаторов в надпоршневых полостях гидроцилиндров 12 прижимают гусеницы 5 к опорной поверхности движения транспортного средства и могут совершать независимые вертикальные перемещения, обусловленные рельефом поверхности движения, при этом гидролинии 15 и 16 через двухпозиционные гидрораспределители 11 связаны друг с другом, что обеспечивает перетекание рабочей жидкости из одной полости каждого гидроцилиндра 12 в другую.

При крутом повороте грузовика в одну из сторон, например влево, водитель воздействует на рулевой вал 3, который перемещает копир 17 вправо. Кулачок левого гидрораспределителя 11 попадает в левую периферийную выемку копира 17, и пружинный возврат переводит левый гидрораспределитель 11 в позицию, при которой его первая линия связана с четвертой, а вторая — с третьей. Напорная гидролиния 13 сообщается с гидролинией 16, обеспечивающей подвод рабочей жидкости к штоковой полости левого гидроцилиндра 12,

а сливная гидролиния 14 сообщается с гидролинией 15. Напорный клапан 10 определяет необходимый уровень давления в гидросистеме и защищает ее. Под давлением рабочей жидкости поршень гидроцилиндра 12 перемещается, сжимая пружинный амортизатор, а шток гидроцилиндра 12 втягивается, вызывая подъем левого натяжного колеса 6, что уменьшает площадь соприкосновения с грунтом ПГХ отставшего борта грузовика и снижает сопротивление повороту. Правый гидрораспределитель 11 при этом находится в позиции, соответствующей прямолинейному движению, ПГХ забегающего борта грузовика сохраняет площадь соприкосновения с опорной поверхностью и в полной мере реализует сцепление с грунтом, обеспечивая тяговую мощность.

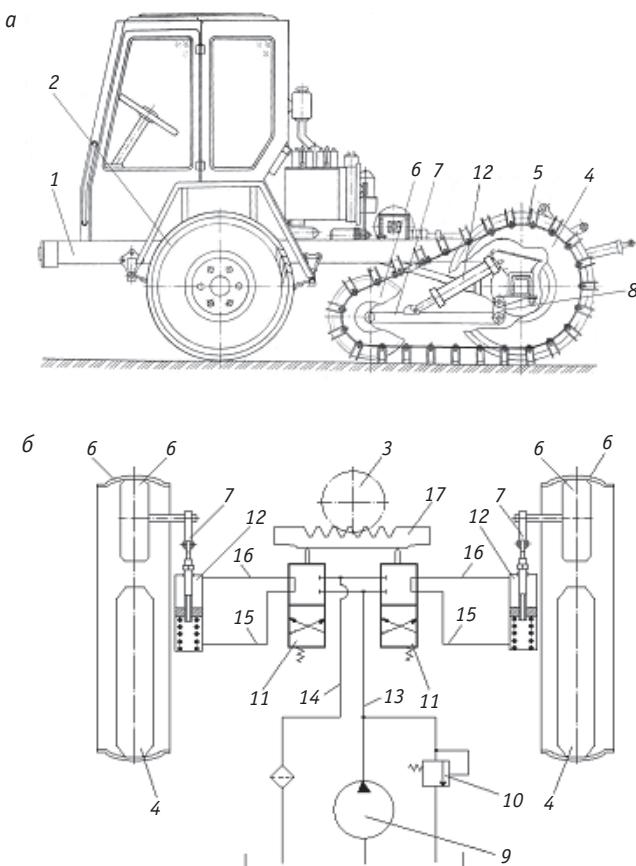


Рис. 1. Грузовик с управляемым ПГХ отставшего борта при повороте:
а — вид на грузовик сбоку; б — гидрокинематическая схема управления;
1 — шасси; 2 — управляемые передние колеса; 3 — рулевой вал;
4 — задние ведущие колеса; 5 — гусеница; 6 — натяжное колесо;
7 — балансир; 8 — серьга; 9 — насос; 10 — напорный клапан;
11 — гидрораспределители; 12 — гидроцилиндры; 13 — напорная гидролиния;
14 — сливная гидролиния; 15, 16 — гидролинии; 17 — копир

При выходе из поворота левый гидрораспределитель 11 переходит в исходную позицию, пружинный амортизатор, воздействуя на поршень левого гидроцилиндра 12, приводит к вытягиванию штока, что вызывает опускание левого натяжного колеса 6.

Поворот в правую сторону производится аналогично, но с участием правых гидрораспределителей 11 и гидроцилиндра 12.

С целью анализа затрат мощности двигателя при крутом повороте фермерского грузовика, оснащенного ПГХ, была разработана расчетная схема, представленная на рис. 2.

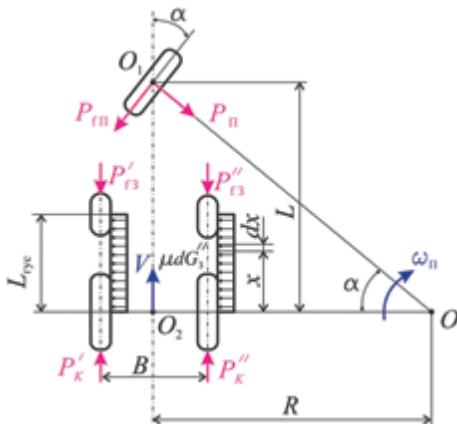


Рис. 2. Схема к расчету поворота транспортного средства с полугусеничным ходом

На расчетной схеме передний мост заменен обобщенным колесом, взаимодействующим с опорной поверхностью в точке O_1 , к которому приложена сила сопротивления качения P_{f1} переднего моста и поворачивающая сила P_{π} . Гусеницы ПГХ условно не показаны, боковой увод колес не учитывается. К ПГХ забегающего борта приложены сила сопротивления качения P_{f3}' и касательная сила тяги P_k' , а к ПГХ отстающего борта — соответственно сила сопротивления качения P_{f3}'' и касательная сила тяги P_k'' . Грунт, нагребаемый торцевыми поверхностями гусениц ПГХ обоих бортов, создает силы сопротивления повороту, эпюра которых показана на схеме.

Силы сопротивления качения колес переднего моста и ПГХ обоих бортов рассчитываются по формулам:

$$P_{f1} = f_{\pi} \cdot (1 - \lambda) \cdot G; \quad (1)$$

$$P_{f3}' = P_{f3}'' = 0,5 \cdot f_3 \cdot \lambda \cdot G, \quad (2)$$

где f_{π} и f_3 — коэффициенты сопротивления качению колес и гусениц соответственно;

λ — коэффициент нагрузки задних ведущих колес;
 G — полный вес грузовика.

Рассматривая установившееся движение на повороте, составим уравнение равновесия в виде

$$M_{\text{пов}} - M_{\text{сопр}} = 0, \quad (3)$$

где $M_{\text{пов}}$ и $M_{\text{сопр}}$ — суммы моментов движущих сил и сил сопротивления движению соответственно.

С учетом рис. 2 и принимая, что включена блокировка дифференциала, а эпюры нормальных нагрузок на опорную поверхность под гусеницами ПГХ равномерны, запишем:

$$M_{\text{пов}} = P_k' \cdot (R + 0,5 \cdot B) + P_k'' \cdot (R - 0,5 \cdot B) = P_{k_{\text{нов}}} \cdot R; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{сопр}} &= P_{f1} \cdot \sqrt{R^2 + L^2} + P_{f3}'(R + 0,5 \cdot B) + \\ &+ P_{f3}'' \cdot (R - 0,5 \cdot B) + 2 \cdot \int_0^{L_{\text{тк}}} \mu \cdot \frac{\lambda \cdot G}{L_{\text{тк}}} \cdot x \cdot dx, \end{aligned} \quad (5)$$

где R — радиус поворота грузовика;

B и L — поперечная и продольная базы грузовика соответственно;

$L_{\text{тк}}$ — длина опорной поверхности гусеницы ПГХ;

dx и x — размер элементарной площадки опорной поверхности и ее продольная координата соответственно;

μ — коэффициент сопротивления повороту гусениц.

Подставляя выражения в (3) и производя преобразования, получим

$$P_{k_{\text{нов}}} = f_{\pi} \cdot (1 - \lambda) \cdot G \cdot \frac{\sqrt{R^2 + L^2}}{R} + f_3 \cdot \lambda \cdot G + \mu \cdot \lambda \cdot G \cdot \frac{L_{\text{тк}}}{R}. \quad (6)$$

При подъеме ПГХ отстающего борта выражение (6) примет вид

$$\begin{aligned} P_{k_{\text{нов}}} &= f_{\pi} \cdot (1 - \lambda) \cdot G \cdot \frac{\sqrt{R^2 + L^2}}{R} + \\ &+ f_3 \cdot \lambda \cdot G + 0,5 \cdot \mu \cdot \lambda \cdot G \cdot \frac{L_{\text{тк}}}{R}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты расчетов по формулам (6) и (7) представлены на рис. 3.

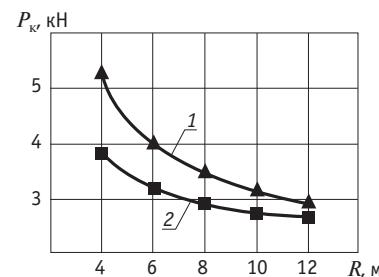


Рис. 3. Зависимости потребной касательной силы тяги P_k от радиуса поворота R грузовика:

1 — при взаимодействии с грунтом ПГХ обоих бортов;
2 — при поднятом ПГХ отстающего борта

Из графиков рис. 3 видно, что подъем ПГХ отстающего борта существенно снижает потребную касательную силу тяги, особенно при малых радиусах поворота.

Рассмотрим крутой ($R = 4$ м) поворот фермерского грузовика, имеющего на входе в поворот скорость V . Затраты мощности двигателя грузовика N при этом можно определить по формуле

$$N = \frac{P_{k_{\text{нов}}} \cdot V}{3,6 \cdot \eta}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где η — КПД силовой передачи.

Результаты расчетов по формуле (8) представлены на рис. 4.

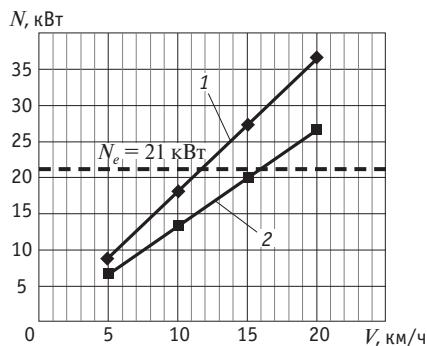


Рис. 4. Зависимости затрат мощности N грузовика на крутой поворот ($R = 4$ м) от скорости вхождения V в поворот:

1 — при взаимодействии с грунтом ПГХ обоих бортов;
2 — при поднятом ПГХ отстающего борта

Анализ графиков рис. 4 показал следующее.

1. Затраты мощности двигателя фермерского грузовика с поднятым ПГХ отстающего борта при крутом повороте ($R = 4$ м) снижаются во всем диапазоне скоростей движения.

2. Подъем ПГХ отстающего борта позволяет увеличить не менее чем на 30 % предельную по условию мощности двигателя скорость вхождения фермерского грузовика в круговой поворот.

Таким образом, использование предложенного схемного решения управляемого полугусеничного хода обеспечивает проходимость и маневренность фермерского грузовика, что способствует повышению транспортной производительности.

Литература

- Дзоценидзе Т. Д. Обоснование параметров малогабаритных транспортных средств сельскохозяйственного назначения с широкими функциональными возможностями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГАУ, 2009. 33 с.
- Автомобильный транспорт для малых форм хозяйствования. Конструкция и особенности эксплуатации : монография / Т. Д. Дзоценидзе, М. А. Козловская, Д. А. Загарин и др. М. : Металлургиздат, 2011. 288 с.
- Загарин Д. А. Обоснование параметров и режимов работы малогабаритного транспортного средства для малых форм хозяйствования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : МГАУ, 2010. 16 с.
- Войнаш С. А., Войнаш А. С. Анализ концептуальных подходов к решению проблемы механизации работ в крестьянских (фермерских) хозяйствах // Тракторы и сельхозмашини. 2012. № 3. С. 51–55. ISSN 0235-8573.
- Войнаш С. А. Особенности решения проблемы механизации работ при малых формах хозяйствования в лесостепных районах России // Технология колесных и гусеничных машин — Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2013. № 1. С. 18–21. ISSN 2227-9393.
- Фермерский грузовик с самосвальным кузовом аппарельного типа / С. А. Войнаш, А. С. Войнаш, Т. А. Жарикова и др. // Аграрная наука — сельскому хозяйству : сб. статей; кн. 3. Барнаул : РИО АГАУ, 2013. С. 32–34.
- Войнаш А. С. Обеспечение проходимости малогабаритных транспортно-технологических агрегатов // Известия ТулГУ. Проблемы сельскохозяйственного машиностроения, 2005. Вып. 2. С. 22–25.
- Транспортное средство : пат. 2441794 Российская Федерация.

References

- Dzotsenidze T. D. Obosnovanie parametrov malogabaritnykh transportnykh sredstv selskokhozyaystvennogo naznacheniya s shirokimi funktsionalnymi vozmozhnostyami [Substantiation of parameters of small agricultural vehicles with broad functionality] : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. M. : MGAU, 2009. 33 s.
- Avtomobilny transport dlya malykh form khozyaystvovaniya. Konstruktsiya i osobennosti ekspluatatsii : monografiya [Road transport for small farms. design and operating features : monograph] / T. D. Dzotsenidze, M. A. Kozlovskaya, D. A. Zagarin i dr. M. : Metallurgizdat, 2011. 288 s.
- Zagarin D. A. Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty malogabaritnogo transportnogo sredstva dlya malykh form khozyaystvovaniya [Substantiation of parameters and operating modes of small farm vehicle] : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M. : MGAU, 2010. 16 s.
- Voynash S. A., Voynash A. S. Analiz kontseptualnykh podkhodov k resheniyu problemy mekhanizatsii rabot v krestyanskikh (fermerskikh) khozyaystvakh [Analysis of conceptual approaches to solving the problem of mechanization of operations in farms] // Traktory i selkhozmashiny. 2012. № 3. С. 51–55. ISSN 0235-8573.
- Voynash S. A. Osobennosti resheniya problemy mekhanizatsii rabot pri malykh formakh khozyaystvovaniya v lesostepnykh rayonakh Rossii [Specifics in solving the problem of mechanization of farms operation in the steppe regions of Russia] // Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin — Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2013. № 1. С. 18–21. ISSN 2227-9393.
- Fermerskiy gruzovik s samosvalnym kuzovom apparelnogo tipa [Farm truck with ramp-type tipping body] / S. A. Voynash, A. S. Voynash, T. A. Zharikova i dr. // Agrarnaya nauka — selskomu khozyaystvu : sb. statey; kn. 3. Barnaul : RIO AGAU, 2013. S. 32–34.
- Voynash A. S. Obespechenie prokhodimosti malogabaritnykh transportno-tehnologicheskikh agregatov [Ensuring maneuverability of small-sized transport and technological units] // Izvestiya TulGU. Problemy selskokhozyaystvennogo mashinostroeniya, 2005. Вып. 2. С. 22–25.
- Transportnoe sredstvo [Vehicle] : pat. 2441794 Rossiyskaya Federatsiya.

УДК 621.311

Александр Сергеевич Вильгельм, кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-исследовательской части Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),
 Владислав Леонидович Незевак, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),
 Василий Титович Черемисин, доктор технических наук, профессор, директор Института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА МАЛОМ КОЛЬЦЕ МОСКОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНВЕРТОРОВ

Alexander Sergeyevich Vilgelm, PhD in Engineering, Research Engineer, Research Department,
 Omsk State Transport University (OSTU),
 Vladislav Leonidovich Nezevak, PhD in Engineering, Senior Research Officer, Research Department,
 Omsk State Transport University (OSTU),
 Vasily Titovich Cheremisin, DSc in Engineering, Professor, Director of the Institute of Energy Saving
 in Railway Transport, Omsk State Transport University (OSTU)

Ways to improve energy efficiency on the Small Ring of Moscow Railway with the help of inverters

Аннотация

Решение транспортной проблемы в Московском регионе связывают с запуском Малого окружного кольца МЖД. Работы по проекту предусматривают электрификацию участка и эффективное использование энергии рекуперации. Одним из вариантов повышения энергоэффективности является установка на тяговых подстанциях приемников энергии рекуперации, в частности выпрямительно-инверторных преобразователей или накопителей электрической энергии.

Ключевые слова: энергия рекуперации, накопители электроэнергии, инверторы, тяговые подстанции, энергоэффективность.

Summary

Solution of the transport problem in the Moscow region is associated with the launch of the Small Ring of the Moscow Railway. Project work includes electrification of the section and the efficient use of energy recovery. One option to improve energy efficiency is the installation of recovered energy receivers on traction substations, in particular, rectifier-inverter converters or electrical energy storages.

Keywords: recovered energy, power drives, inverters, traction substations, energy efficiency.

Pение транспортной проблемы Москвы предусматривает целый ряд мероприятий, которые ориентированы на увеличение пассажиро- и грузопотока по магистралям столицы и области. В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации [1] и программой «Развитие транспортной системы» [2] до 2015 г. планируется организовать по Малому кольцу Московской железной дороги (МК МЖД) пассажирское движение и создать пересадочные пункты на радиальные железнодорожные линии и станции метрополитена, что потребует реконструкции инфраструктуры, в том числе электрификации участка (рис. 1).

Особенностями пассажирского движения по МК МЖД являются частые планируемые остановки электропоездов, а также переломный профиль пути. Известно, что именно в таких условиях потенциал энергии рекуперации становится наибольшим, прежде всего для однопутных участков [3, 4]. В связи с этим анализ вариантов реализации энергоэффективной системы тягового электроснабжения с учетом использования потенциала рекуперативного торможения на участке Малого кольца представляет несомненный интерес.

Результаты многочисленных экспериментов в условиях интенсивного применения рекуперативного торможения на однопутных участках подтверждают высокую эффективность выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), установленных на тяговых подстанциях (ТПС) [5]. Использование приемников избыточной энергии рекуперации (ВИП, поглощающих устройства или накопителей электрической энергии) на двухпутных участках менее эффективно и обусловлено в основном наличием поездов в режиме тяги на обоих путях, особенно при интенсивном движении электроподвижного состава (ЭПС) [6].



Рис. 1. Схема планируемой реконструкции Малого кольца Московской железной дороги

Однако именно в таких условиях планируется эксплуатировать систему тягового электроснабжения Малого кольца. Следует отметить, что не во всех случаях применение ВИП для приема избыточной энергии рекуперации имеет преимущество перед аналогичными устройствами, что определяется в первую очередь величиной избыточной энергии рекуперации на рассматриваемом участке. В той или иной ситуации более эффективным может оказаться поглощающее устройство (ПУ) или накопитель электрической энергии (НЭЭ). Сравнение энергетической эффективности способов использования избыточной энергии рекуперации [7] представлено на рис. 2.

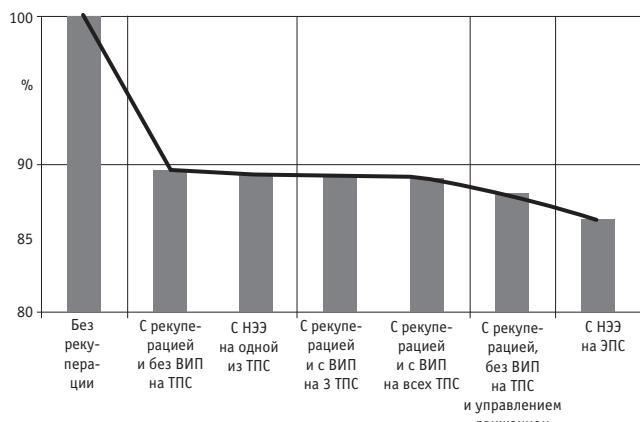


Рис. 2. Удельный расход электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций для различных вариантов расчетов

Как известно, значительным потенциалом рекуперативного торможения обладают участки, имеющие переломный профиль пути, или такие, на которых движение осуществляется в условиях частых остановок поездов с минимальными интервалами движения, т.е. режим ведения ЭПС характеризуется непродолжительностью режима выбега и частым торможением. Применение рекуперативного торможения может быть эффективным только при потреблении вырабатываемой энергией рекуперации ЭПС, следующим в режиме тяги, или дополнительными приемниками энергии, такими как ВИП, НЭЭ или ПУ. Внедрение этих устройств не всегда экономически оправданно, что подтверждается предварительными технико-экономическими расчетами.

При организации пассажирского движения на МК МЖД в условиях интенсивного движения с малыми расстояниями между остановочными пунктами удельные затраты электроэнергии на тягу поездов существенно выше, нежели для пригородного движения, для которого характерны большие расстояния между остановками. Соответственно при электрификации МК необходимо учитывать эти особенности. Одним из мероприятий, обеспечивающих повышение энергоэффективности перевозок, может стать применение рекуперативного торможения с использованием на участке дополнительных приемников избыточной энергии рекуперации — ВИП, НЭЭ или ПУ. В связи со значительной стоимостью этих устройств возникает необходимость выбора оптимального варианта их установки.

Профиль пути МК (рис. 3) характеризуется уклонами, достигающими 10 %. По проекту электрификации на участке предусматривается монтаж пяти тяговых подстанций постоянного тока и сооружение 32 остановочных пунктов. В соответствии с планом размеры пассажирского движения на расчетный срок определены в 60 пар электропоездов в сутки, а на перспективу — до 100 пар. В качестве пассажирских планируется использовать электропоезда Desiro с весовой нормой до 568 т.

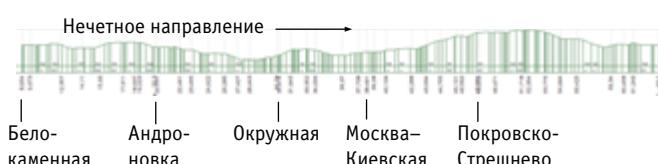


Рис. 3. Продольный профиль МК МЖД с расположением тяговых подстанций

С целью оценки эффективности внедрения на тяговых подстанциях МК приемников избыточной энергии рекуперации были выполнены расчеты для системы тягового электроснабжения (СТЭ) в программном комплексе «КОРТЭС», учитывающие расчетные и перспективные размеры движения.

По результатам тяговых расчетов была определена величина абсолютной энергии рекуперации, т.е. энергии, которая может быть выработана ЭПС при применении рекуперативного торможения по его электромеханическим характеристикам. Для расчетных размеров движения эта величина составила 61,5 тыс. кВт·ч (15,4 % от потребления энергии на тягу). Для данных условий при применении рекуперативного торможения и отсутствии приемников избыточной энергии рекуперации может быть реализовано 80,4 % абсолютной энергии рекуперации

(49,4 тыс. кВт·ч/сут). В случае установки ВИП на всех тяговых подстанциях участков МК потенциал рекуперации будет реализован практически полностью (98,1% от абсолютной величины), в том числе 15,0% может быть возвращено ВИП в систему внешнего электроснабжения (9,2 тыс. кВт·ч/сут).

Для перспективных размеров движения (до 100 пар электропоездов) использование рекуперативного торможения при отсутствии приемников избыточной энергии рекуперации ЭПС, следующими в тяге, может быть потреблено, как показали расчеты, до 91,1% абсолютной энергии рекуперации (68,4 тыс. кВт·ч/сут). Установка ВИП на всех тяговых подстанциях в этом случае позволит увеличить реализацию энергии рекуперации до 98,9% от абсолютной величины, в том числе около 5,9% абсолютной энергии рекуперации будет возвращено ВИП в систему внешнего электроснабжения (4,6 тыс. кВт·ч/сут).

Расчетный расход электроэнергии на тягу по тяговым подстанциям распределен неравномерно — наибольший зафиксирован на тяговой подстанции Белокаменная, наименьший — на подстанции Окружная (рис. 4).

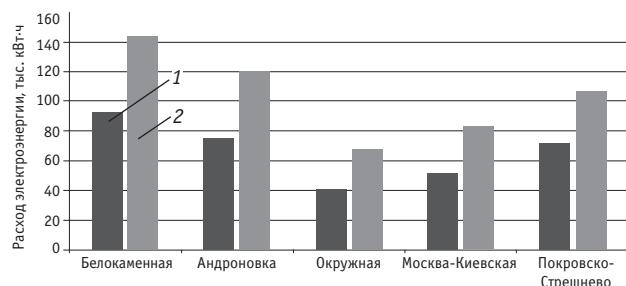


Рис. 4. Расход электроэнергии на тягу по тяговым подстанциям МК МЖД:
1 — расчетный; 2 — перспективный

Возврат электроэнергии ВИП распределен аналогично: наибольший наблюдается на тяговой подстанции Белокаменная, на тяговой подстанции Окружная возврат электроэнергии отсутствует (рис. 5).

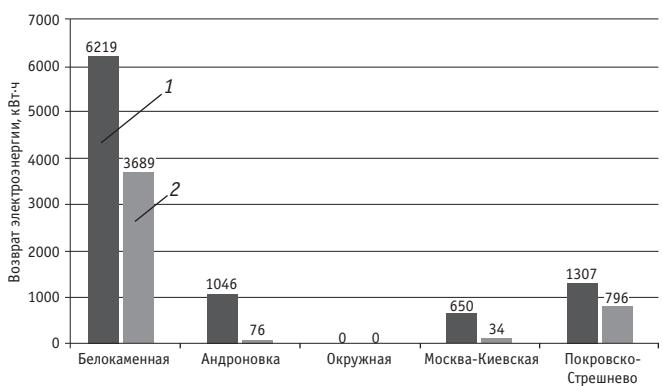


Рис. 5. Возврат электроэнергии по ТПС Малого кольца МЖД при установке ВИП на каждой подстанции:
1 — расчетный; 2 — перспективный

Из рис. 5 видно, что для обоих вариантов — с расчетными, и с перспективными размерами движения — наибольший потенциал возврата избыточной энергии рекуперации зафик-

сирован на тяговой подстанции Белокаменная. Здесь при расчетных объемах движения (60 пар) и при наличии ВИП можно реализовать 86,2% абсолютной энергии рекуперации, в том числе около 10,5% возвратить в систему внешнего электроснабжения (6,22 тыс. кВт·ч/сут).

Применительно к тяговой подстанции Белокаменная при использовании сальтированных расчетов за электроэнергию простой срок окупаемости для расчетных и перспективных размеров движения для варианта размещения ВИП составит соответственно около 4 и 7 лет. Для других тяговых подстанций использование ВИП нецелесообразно из-за значительных сроков окупаемости. Как показывают расчеты, применение НЭЭ на тяговой подстанции имеет большие сроки окупаемости по сравнению с ВИП, что обусловлено в первую очередь существенно большими капитальными вложениями.

Как правило, наибольший возврат по отдельным тяговым подстанциям участка обусловлен характером профиля пути и имеет максимальное значение в зонах с холмистым профилем. Профиль пути на всем участке МК — относительно однотипный, и наибольшая расчетная величина потенциала возврата энергии по тяговой подстанции Белокаменная не может быть объяснена особенностями профиля в межподстанционных зонах (МПЗ), питаемых этой подстанцией. Для выявления причин наибольшего возврата энергии по конкретной тяговой подстанции необходим анализ тяговых расчетов. Тяговый расчет представляет собой определение зависимостей скорости, тока, координаты поезда от времени хода по участку, силы тяги, а также интегральных показателей — затраченной энергии при тяге и при рекуперации, КПД и пр.

Исходными данными для тягового расчета являются профиль пути с расположением остановочных пунктов, тип и масса поезда, средняя скорость по участку (или время хода), режим ведения поезда с учетом участков с ограничением скорости, режим напряжения в контактной сети и др.

На рис. 6 и 7 представлены характеристики длин перегонов МК. Анализ показал, что перегоны между остановочными пунктами, расположенными на МПЗ Белокаменная — Андроновка, характеризуются максимальными значениями из ряда наибольших, средних и наименьших длин всех перегонов на межподстанционных зонах Малого кольца МЖД.

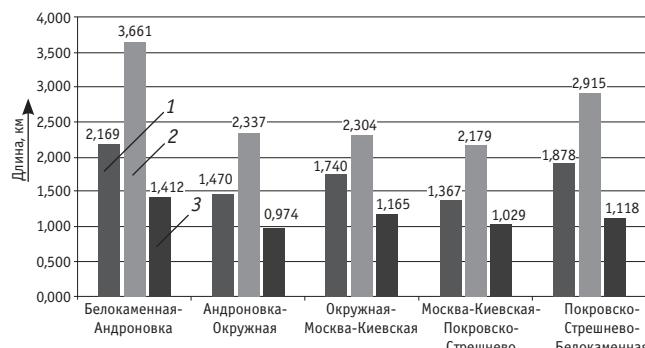


Рис. 6. Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) длины перегонов по каждой МПЗ МК

Как видно из рис. 6, эти значения для МПЗ Белокаменная — Андроновка составляют соответственно 3661, 2169 и 1412 м.

Если рассмотреть аналогичные показатели в совокупности для смежных МПЗ подстанции, то наибольшую протяженность имеют перегоны на зонах Андроновка — Белокаменная — Покровско-Стрешнево, получающих питание от тяговой подстанции Белокаменная. Таким образом, одна из особенностей МПЗ, прилегающих к тяговой подстанции Белокаменная, — увеличенные длины перегонов между остановочными пунктами, позволяющие реализовать на этих участках большую скорость движения, а следовательно, способствующие увеличению возврата энергии при рекуперативном торможении. На рис. 8 представлена диаграмма максимальных значений токов электропоездов Desiro по перегонам МК в режимах тяги и рекуперации.

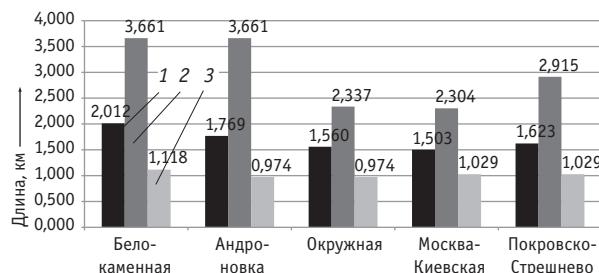


Рис. 7. Средние (1), максимальные (2) и минимальные (3) длины перегонов по двум смежным МПЗ, получающим питание от соответствующих тяговых подстанций МК

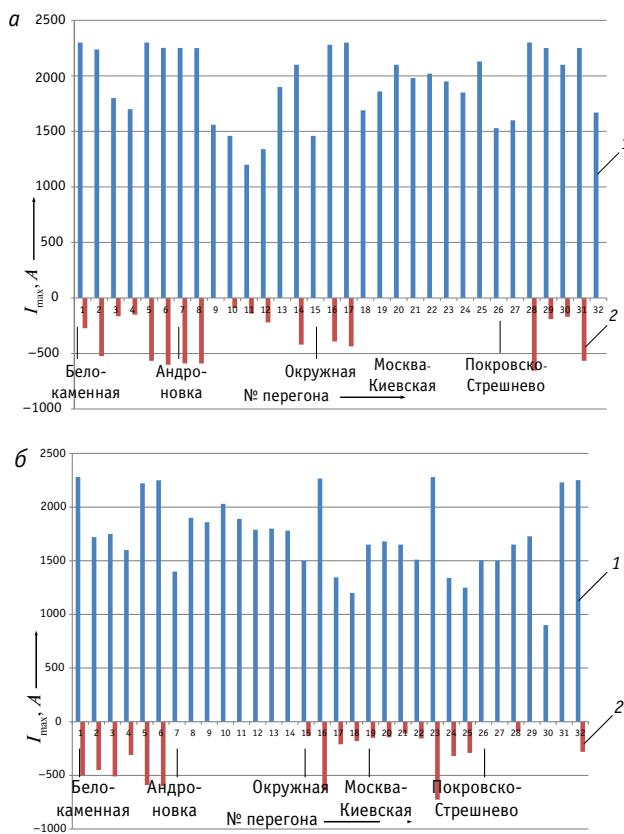


Рис. 8. Диаграмма максимальных расчетных значений токов в режимах тяги (1) и рекуперации (2) по перегонам Малого кольца:
а — в нечетном; б — в четном направлении

Незначительная протяженность перегонов по МПЗ Москва-Киевская — Покровско-Стрешнево и наличие подъема не позволяют применять в этой зоне рекуперацию в нечетном направлении. По тем же причинам рекуперация невозможна в четном направлении в МПЗ Андроновка — Окружная. Наибольший потенциал рекуперации выявлен на перегонах, где токи рекуперации превышают значения 500 А. Тяговые расчеты показали, что такое значение тока рекуперации на перегонах МК может быть достигнуто при переходе в режим рекуперации после разгона до 100 км/ч и выше. Максимальные значения расчетных скоростей на участке МК представлены на рис. 9.

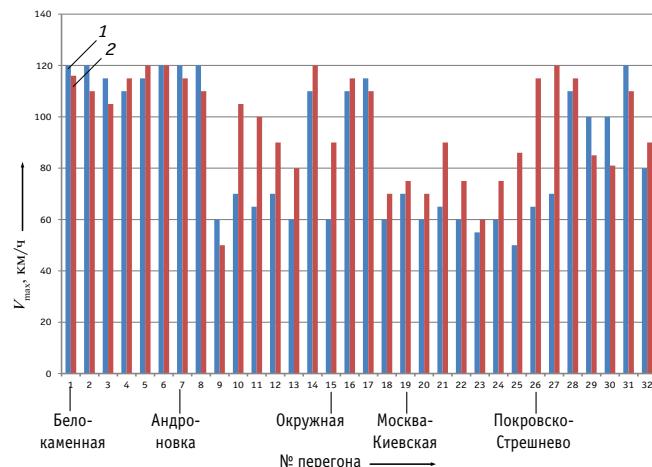


Рис. 9. Диаграмма максимальных значений скорости, достигаемой на перегонах Малого кольца в четном (2) и нечетном (1) направлениях

Согласно расчетам, из 32 перегонов МК значения токов в режиме рекуперативного торможения свыше 500 А получены лишь на семи перегонах в нечетном и на пяти перегонах в четном направлении. Из них на межподстанционные зоны Покровско-Стрешнево — Белокаменная — Андроновка, получающие питание от тяговой подстанции Белокаменная, приходится пять перегонов в нечетном и три — в четном направлении. Этим, в частности, и объясняется ожидаемый наибольший возврат энергии рекуперативного торможения на тяговой подстанции Белокаменная.

Таким образом, установлено, что при реализации расчетных и перспективных размеров движения максимальная величина возврата энергии наблюдается на тяговой подстанции Белокаменная. Это объясняется в первую очередь большими длинами перегонов между остановочными пунктами на МПЗ Андроновка — Белокаменная — Покровско-Стрешнево по сравнению с другими зонами Малого кольца, что, в свою очередь, приводит к соответствующему увеличению скорости электропоезда, времени рекуперативного торможения каждым электропоездом, проходящим по участку, а также повышает величину потенциала возврата электроэнергии при рекуперации. На участках с организацией движения при частых остановках поездов и незначительной длине перегонов определяющими факторами, которые влияют на объемы энергии рекуперации,

становятся не характеристики профиля пути, а длины перегонов и наибольшая достигаемая на них скорость ЭПС. В рассматриваемом случае единственным вариантом эффективного использования ВИП на электрифицированных участках МК

является их установка на подстанции Белокаменная. Остальные варианты, в том числе и с применением накопителей электрической энергии, в настоящее время, как показывают расчеты, нецелесообразны.

Литература

1. О Транспортной стратегии Российской Федерации : распоряжение Правительства РФ от 22.11.08 № 1734-р // Собрание законодательства РФ. 2008. № 50.
2. Об утверждении государственной программы «Развитие транспортной системы» : распоряжение Правительства РФ от 28.12.12 № 2600-р // Собрание законодательства РФ. 2013. № 2.
3. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижного состава / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак и др. // Локомотив. 2013. № 8. С. 5–8.
4. Вильгельм А. С., Незевак В. Л. Перспективы регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока при применении рекуперативного торможения // Проблемы и перспективы развития транспорта : матер. междунар. науч.-практ. конф. / МИИТ. М., 2012. С. 102–103.
5. Вильгельм А. С., Ларин А. Н. Экспериментальные исследования по оценке потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. 2011. № 1 (5). С. 50–56.
6. Черемисин В. Т., Вильгельм А. С. Оценка способов повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижным составом // The 6th International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia / Korea National University of Transportation. Chungbuk, 2013. Р. 147–151.
7. Незевак В. Л. Об эффективности приемников энергии рекуперативного торможения в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта : матер. Всерос. науч.-практ. конф. / ЗабИЖТ. Чита, 2013. С. 37–43.

References

1. O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii : rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 22.11.08 № 1734-r [On the Transport Strategy of the Russian Federation : RF Government Resolution No. 1734-r of 22.11.08] // Sobranie zakonodatelstva RF. 2008. № 50.
2. Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy «Razvitiye transportnoy sistemy» : rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 28.12.12 № 2600-r [On approval of the State Program «Development of Transport System»: RF Government Resolution No. 2600-r of 28.12.12] // Sobranie zakonodatelstva RF. 2013. № 2.
3. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyah rekuperatsii elektropodvizhnogo sostava [Improving energy efficiency of traction power supply system in the context of energy recovery of electric rolling stock] / V. T. Cheremisin, A. S. Vilgelm, V. L. Nezevak i dr. // Lokomotiv. 2013. № 8. S. 5–8.
4. Vilgelm A. S., Nezevak V. L. Perspektivy regulirovaniya napryazheniya v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka pri primenenii rekuperativnogo tormozheniya [Prospects of voltage regulation in DC traction power systems using regenerative braking] // Problemy i perspektivi razvitiya transporta : mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / MIIT. M., 2012. S. 102–103.
5. Vilgelm A. S., Larin A. N. Eksperimentalnye issledovaniya po otsenke potentsiala povysheniya energeticheskoy effektivnosti tyagi poezdov za scet primeneniya rekuperativnogo tormozheniya [Experimental study to assess the potential for improving energy efficiency of train traction through the use of regenerative braking] // Izvestiya Transsiba. 2011. № 1 (5). S. 50–56.
6. Cheremisin V. T., Vilgelm A. S. Otsenka sposobov povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyah rekuperatsii elektropodvizhnym sostavom [Assessment of ways to improve energy efficiency of traction power supply system in the context of energy recovery of electric rolling stock] // The 6th International Symposium for Transportation Universities in Europe and Asia / Korea National University of Transportation. Chungbuk, 2013. P. 147–151.
7. Nezevak V. L. Ob effektivnosti priemnikov energii rekuperativnogo tormozheniya v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Effectiveness of receivers of regenerative braking in DC traction power system] // Problemy proektirovaniya, stroyitelstva, diagnostiki i tekhnicheskogo soderzhaniya obyektov zhelezodorozhzhogo transporta : mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. / ZabIZhT. Chita, 2013. S. 37–43.

УДК 621.311

Эльхан Шахбаба оглы Мурадов, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе
ООО «Технос», Екатеринбург

ГИБРИДНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ НА НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК 250 А

Elkhan Shakhbaba ogly Muradov, Deputy Director for Research, LLC Technos, Ekaterinburg

Hybrid quick-break circuit breaker with rated current 250 A

Аннотация

В статье изложены результаты разработки и исследования нового гибридного быстродействующего автоматического выключателя постоянного тока производства ООО «Технос» (Екатеринбург). Дано описание работы выключателя, приведена его структурная блок-схема. Выключатель имеет электронный модуль отключения тока до номинального значения любого направления, электромагнитный механизм для отключения токов недопустимых перегрузок и токов короткого замыкания, последовательное магнитное дутье, электронные датчики тока и направления тока, датчики контроля температуры силовых транзисторов и микропроцессорную систему управления, что позволяет аппарату отключать токи любой величины (в заданных пределах) и любого направления, а также повышать коммутационную способность выключателя и уменьшать эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: гибридный выключатель, автоматический быстродействующий, электробезопасность городского электротранспорта, номинальный коммутационный ресурс, критическая коммутационная способность, критический ток, последовательное магнитное дутье, электронный модуль отключения тока, силовой транзистор, контроллер, датчик температуры, датчик направления тока, структурная блок-схема выключателя.

Summary

The article presents the results of research and development of new hybrid quick-break DC circuit breaker made by LLC Technos (Ekaterinburg). Circuit breaker operation is described, a block schematic diagram is provided. The circuit breaker has an electronic current interruption module to the nominal value of any direction, electromagnetic mechanism to turn off unacceptable overload current and short-circuit currents, consistent magnetic blowout, electric current sensors and current directions, sensors monitoring the temperature of power transistors and microprocessor control system which allows the unit to switch off currents of any strength (within specified limits) and any direction, as well as to increase the switching capacity of the circuit breaker and reduce operating costs.

Keywords: hybrid quick-break circuit-breaker, electrical safety of electrical urban transport, nominal switching resource, critical switching capacity, critical current, consistent magnetic blowout, electronic module current interruption module, power transistor, controller, temperature sensor, current direction, structural block diagram of the circuit breaker.

В настоящее время в промышленности и на транспорте используется большое количество цепей постоянного тока, например, для электропривода прокатных станов, электролиза чистых элементов и химических соединений, рафинирования и электрохимического осаждения металлов, привода подвижных объектов городского электротранспорта (ГЭТ) — метро, троллейбусов, трамваев. На отдельных участках железных дорог применяется система привода подвижного состава постоянным током. Для защиты цепей постоянного тока от действия токов перегрузки и коротких замыканий (КЗ) повсеместно используются автоматические быстродействующие выключатели (АБВ). Серийно выпускаемые в настоящий момент выключатели постоянного тока коммутируют ток в цепи путем ее разрыва контактами, зажигающуюся дугу при этом гасят с помощью всевозможных методов — от простого растягивания дуги до дробления в деионных решетках дугогасительных камер.

Для придания АБВ постоянного тока новых потребительских свойств, выявления существенных отличий от предшествующих конструкций целесообразно провести анализ выключателей данного типа, выпускаемых отечественными и некоторыми зарубежными производителями. Практически у всех рассмотренных АБВ обнаруживаются параметры, которые нельзя назвать полностью негативными, но тем не менее любой производитель этого оборудования хотел бы либо их улучшить, либо от них полностью избавиться. Остановимся на двух важных характеристиках быстродействующих выключателей.

1. Номинальный коммутационный ресурс выключателя — это количество операций, т.е. количество циклов включения-отключения, которое может совершить выключатель, коммутируя цепь с номинальным током при номинальном напряжении без поломок и серьезного технического обслуживания.

Данный параметр напрямую зависит от контактной системы коммутационного аппарата, обеспечивающей непрерывность электрической цепи. Поскольку в процессе замыкания и размыкания электрических цепей участвует как минимум два контакта (в АБВ обычно устанавливаются подвижный и неподвижный контакты), номинальный коммутационный ресурс аппарата зависит от величины силы контактного нажатия (КН). Хотя было бы вернее понятие «контактное нажатие» сформулировать как «давление силы контактного нажатия на площадь контактирования». При расчете величины силы КН ее значения

обычно рассматриваются лишь как оценочные, т.е. они непременно должны уточняться сравнением с опытными данными. Обусловлено это многообразием факторов, влияющих на процессы в контактах, многие из которых неоднозначны и нередко имеют случайную природу. С другой стороны, для получения формул расчета необходимой величины силы КН в настоящее время учитываются лишь теплофизические процессы. В качестве основного условия принимается допустимая величина абсолютной (в градусах Кельвина) температуры нагрева контакта T_k и площадки контактирования T_n . При таких исходных положениях расчетное значение необходимой величины силы нажатия F_k в одноточечном контакте на ток I определяется выражением

$$F_k = \frac{I^2 A_d \pi H}{16 \lambda^2 \arccos^2(T_k / T_n)}, \quad (1)$$

где $A_d = 2,33 - 2,37 \cdot 10^{-8} (\text{В}/\text{К})^2$ — физическая константа — постоянная Лоренца;

H — твердость по Бринеллю контактного материала;

λ — теплопроводность.

Хотя расчетное значение силы в многоточечном контакте должно обеспечиваться в каждой точке, это не приводит к повышению общей силы, наоборот, требуемое нажатие практически пропорционально снижается, поскольку расчетный ток делится между этими точками, а сила пропорциональна квадрату силы тока. В целом необходимая удельная величина нажатия в контактах специализированных аппаратов, приспособленных к условиям работы на подвижных установках, находится в пределах 0,3–0,4 Н/А.

Среди множества требований к контактным соединениям в качестве основных можно выделить следующие: малое переходное сопротивление; низкое КН; возможность работы при различной степени загрязненности воздуха; наименьшая подверженность свариванию и залипанию; большая работоспособность при высоких температурах; высокая механическая и электрическая износостойкость; улучшенная проводимость; незначительная подверженность эрозионным явлениям. Также свойства контактных материалов должны способствовать сходу электрической дуги на дугогасительные рога и ускорять процессы дейонизации в ней.

От формы и состояния поверхности коммутирующих контактов зависит ряд их параметров, таких как нагрев контактов, дугообразование в зоне контактирования и т.д. При любой чистоте обработки две металлические детали будут соприкасаться не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках по микровыступам. Известно, что абсолютно гладкой поверхности не существует. Способ и степень чистоты обработки поверхностей с учетом материала контакт-детали во многом определяет зоны контактирования как для линейных, так и для точечных контактов. Основным параметром степени чистоты обработки является шероховатость поверхности. Шероховатость поверхности — это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины [1]. Базовая длина — параметр, отражающий способы технологии обработки поверхностей. Параметр шеро-

ховатости Ra — среднее арифметическое отклонение профиля, при классах шероховатости 8–12 базовая длина имеет значение $l = 0,25$ мм [2].

В наиболее популярных в настоящее время моделях шероховатость двух соприкасающихся контактных поверхностей эквивалентируется соприкоснениям отдельных выступов в виде сферических сегментов с идеально гладкой поверхностью на одной из них [3]. В рамках этих моделей удалось выявить такие важные особенности контактирования, как пропорциональность фактической площади контактирования нагрузке и незначительное влияние нагрузки на фактическое давление. В целом для увеличения площади фактического контактирования необходимо иметь хорошую плоскость Π_s контактной поверхности с площадью S , которую можно определить для одной контакт-детали по формуле

$$\Pi_s = [k \cdot S / l \cdot (h_{i\max} + h_{i\min})] \cdot 100\%,$$

где $h_{i\max}$ — расстояние от высших точек выступов наибольших максимумов до линии параллельной и средней и не пересекающей профиль, мм;

$h_{i\min}$ — расстояние от низших точек впадин наибольших минимумов до этой же линии, мм;

k — коэффициент, отражающий качество обработки контактных поверхностей и учитывающий способы их получения (штампованные, литейные и т.д.).

Качество контактной поверхности определяют не только микровыступы, микровпадины также влияют на эффективность контактирования, задерживая ствол дуги на контактах и увеличивая трение дуги о контактные поверхности, что в дальнейшем воздействует на качество процесса дугогашения. Приближение контактов под давлением силы КН наиболее высокие микровыступы сминаются, тем самым увеличивая фактическую контактную поверхность. Микрорельеф поверхности определяет фактическую площадь соприкоснения контактов. Тонкая кристаллическая структура (субмикроструктура) поверхности создает не только физическую неоднородность, но и геометрическую микронеровность, проявляющуюся в масштабах кристаллических образований [4]. Работа выхода, химическая и каталитическая активность и ряд других физических и физико-химических явлений, протекающих на атомном уровне, зависят от субмикроструктуры и типа выходящих на поверхность кристаллографических плоскостей. Микровыступы играют положительную роль в увеличении энергии активации, поскольку она больше в остирях кристаллов, то на них более активно протекают различные процессы, и это, в свою очередь, вызывает химическую неоднородность поверхности [4]. Под истинным физическим контактом поверхностей двух тел следует понимать такое их сближение, когда между атомами (молекулами) одного тела и атомами (молекулами) другого начинается непосредственное взаимодействие, соизмеримое по силе взаимодействия собственных атомов (молекул) внутри каждого тела. Для твердых кристаллических тел это расстояние приблизительно равно размерам кристаллической решетки [4].

При работе аппарата контакт-детали изнашиваются: теряют часть массы и объема в зоне контактирования за счет выгорания материала электрической дугой, испарения, окисления

и других причин. Работоспособность изношенных и окисленных контактов обеспечивается кинематикой механизма. Механизмом управления движением подвижного контакта после выбора основной части хода резервируется дополнительный избыточный ход (провал) — смещение точки контактирования на неподвижном контакте, например, за счет выгорания примыкающих к ней объемов контакт-деталей δ_3 (рис. 1).

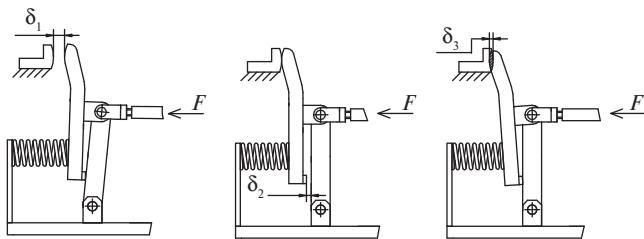


Рис. 1. Раствор и провал контактов:
 δ_1 — раствор (основная часть хода) контактов;
 δ_2 — индикатор избыточного хода (провала)

Этой же цели служит проскальзывание точки контактирования по поверхности неподвижного контакта, при котором с их поверхности сдирается окисная пленка, и перекат для разделения точек начального и конечного контактирования. Обычно обе операции — и перекат, и проскальзывание — протекают одновременно. Совершенно очевидно, что контактный узел имеет ограниченный интервал времени надежной работы. Это время принято оценивать количеством коммутационных операций — коммутационной износостойкостью, которая обычно нормируется раздельно по коммутации аварийных токов и предельных рабочих токов. Действующие ГОСТы на автоматические выключатели и тяговые аппараты [5, 6] допускают три цикла включения-отключения (ВО) предельного аварийного тока с интервалом в 2 мин без зачистки контактов, камеры и подрегулировки параметров срабатывания. Число циклов ВО рабочего тока не нормировано для автоматических выключателей, но рекомендуется инструктивными материалами директивных технических органов величиной в 5000 циклов. Механическая износостойкость — число циклов ВО без тока в главной цепи аппарата — тоже не нормируется, принимается теми же материалами как достаточная величина 50 000 циклов.

Эксплуатация аппаратов с изношенными контактами допускается до тех пор, пока избыточный ход не уменьшится до половины начального значения или до полного износа контактных накладок. После этого контакт-детали необходимо заменять. Ремонтопригодность и доступность изнашиваемых деталей — один из признаков технического совершенства конструкции аппарата. В качестве примера удачной конструкции по этому показателю можно привести контактную систему выключателя АВ-8 [7].

На технические характеристики рассматриваемого узла непосредственное воздействие оказывают физические свойства материала контактов. Основным контактным материалом в аппаратах, предназначенных для подвижных объектов ГЭТ, является твердотянутая медь с повышенными упругими свойствами. Умеренность значений рабочих токов и обусловленный этим

отказ от встраивания в контактный узел дополнительных дугогасительных контактов определяют нецелесообразность применения серебра, также не нашли широкого применения металлокерамики на основе тугоплавких металлов (вольфрама и молибдена) из-за необходимости усиления КН. Тем не менее в ряде случаев оказывается оправданным применение композиции КМК на основе серебра и оксида кадмия (85% Ag, 15% CdO), широко используемой в коммутационных аппаратах общепромышленных типов.

В аппаратах ВБ 7м и ВБ 11, выпускаемых ООО «Технос» (Екатеринбург) для защиты электрооборудования от токов, недопустимых перегрузок и КЗ, композитный контактный материал КМК-А10М (СОК 15) использован для контактных накладок на оба контакта как мера повышения дугостойкости контактных деталей. Электрическая проводимость этого композита почти в два раза хуже серебра ($\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), однако при реальной толщине накладок (2–3 мм) это не приводит к пропорциональному росту термической нагрузки на контактный узел. В выключателе ВБ 11/1-250/6 композитные накладки линейного типа контактирования установлены в контактной системе, в которой принята величина КН $F_k = (80 \pm 20)$ Н [8]. Такое нажатие обеспечивает установившуюся температуру медных контактов $\vartheta_k = 95^\circ\text{C}$ с превышением нагрева площадок фактического контактирования $\Delta t_n = 2,4^\circ\text{K}$. Параметры композита КМК-А10М при температуре нагрева контакт-деталей $\vartheta_k = 95^\circ\text{C}$: удельное сопротивление $\rho = 3,95 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; теплопроводность $\lambda = 312,2$ Вт/м·град; микротвердость H при $T_k = 368^\circ\text{K}$ и $T_{pl} = 1173^\circ\text{K}$ составляет $H = 822,6$ МПа. Расчетная величина температуры площадок фактического контактирования T_n при $T_k = \vartheta_k + 273 = 368^\circ\text{K}$ определяется из соотношения (1) для линейного контакта, простейшее преобразование которого дает:

$$T_n = T_k / \cos(0,25 \cdot I_{hom} K_n \cdot \sqrt{0,5 \pi A_L H / F_k / \lambda}), \quad (2)$$

$T_n = 371,5^\circ\text{K}$, значит, перегрев площадок составляет $\Delta t_n = T_n - T_k = 3,5^\circ\text{K}$.

Таким образом, установка накладок из композита СОК 15 при неизменном КН приводит к повышению перегрева зоны контактирования всего на $1,1^\circ\text{K}$, т.е. практически не изменяет тепловой нагрузки на контактное соединение. Несмотря на удорожание контактного узла в выключателях ВБ 7м и ВБ 11, такое исполнение принято как мера повышения коммутационной стойкости аппарата. Для выключателя ВБ 11/1-400/6 с композитными накладками при тех же исходных условиях ($\vartheta_k = 95^\circ\text{C}$) изменение теплового состояния площадок фактического контактирования заметнее, т.е. превышение над температурой тела контакта составляет 5°K . Такое превышение находится в допустимых пределах — при незначительной толщине накладок локальный незначительный рост их температуры не может изменить теплового режима тела контактов, тем более повлиять на характеристики термической и динамической стойкости, которые при рассматриваемых параметрах обеспечиваются со значительным запасом.

Применение металлокерамики не создает опасности сваривания главных контактов, но однозначно увеличивает механический

ресурс. Оценка величины переходного сопротивления в модифицированном варианте контактного узла на номинальный ток 250 А при температуре нагрева $\vartheta_k = 95^\circ\text{C}$ и величине КН $F_k = 80 \text{ Н}$ составляет ($k_k = 0,03 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент, отражающий свойства материала и состояние поверхности контакта; показатель степени $m = 0,7$ — тип контакта по числу расчетных точек) $r_k = k_k/(F_k)^m = 8,28 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$, а для аппарата ВБ 11/1-400/6 при нажатии $F_k = 140 \text{ Н}$ — соответственно $r_k = 5,598 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$. Разность потенциалов на контакт-деталях $U_k = I_{\text{ном}} \cdot r_k$ — соответственно 20,7 и 22,4 мВ в аппаратах ВБ 11/1-250/6 и ВБ 11/1-400/6, а мощность локальных дополнительных потерь P_k , со средоточенных в зоне контактирования, — 5,2 и 9,0 Вт. Выключатели ВБ 11/1-250/6 и ВБ 11/1-400/6, предназначенные для защиты трамвайных вагонов от токов недопустимых перегрузок и КЗ, прошли испытания на удвоенное число циклов по механическому ресурсу (100 000 ВО), а номинальный коммутационный ресурс — 5500 ВО. Хотя оба аппарата при этом оставались работоспособными, количество циклов ВО все же невелико.

2. Все выключатели по коммутационным параметрам имеют критический ток, определяемый для тяговых аппаратов подвижного состава по [6], или наименьший отключаемый ток, определяемый для выключателей автоматических постоянного тока по [5], детальный анализ которых изложен в [9, 10]. Здесь хотелось бы отметить одну их особенность: критические токи, которые увеличиваются в зависимости от повышения номинального тока выключателя [6, 9], находятся в зоне малых индуктивных токов, дуга критического тока в выключателе горит относительно долго или вообще не гаснет, что ведет к снижению ресурса и надежности выключателя или к его отказу. Сведение к минимуму диапазона критических токов приводит к усложнению конструкции и повышению себестоимости аппарата.

Например, у выключателя типа ВБ-13/1-400/6 [10–13], одной из лучших разработок ООО «Технос», механический ресурс составляет 150 000 циклов, а номинальный коммутационный ресурс — 6000 циклов. Но для достижения отсутствия неотключаемых токов у выключателя внедрено комбинированное магнитное дутье — последовательно-параллельное [10, 14], даже при этом критический ток аппарата составляет 7–14 А, а время гашения дуги при этих токах — 200–300 мс.

Необходимость создания гибридных коммутационных аппаратов очевидна. В целях исключения диапазона критических токов в коммутационных аппаратах целесообразно применение электроники, однако полностью переводить отключение токов на электронные приборы было бы нерационально, так как в мощных приборах, если они даже имеются, выделяемые мощности (теряющиеся на тепловую энергию) существенны; испытательное напряжение коммутационных аппаратов измеряется десятками кВ; имеют место случайные факторы, например обратный ток большой величины; напряжение другой полярности выше пробивного напряжения.

Отключение малых индуктивных постоянных токов могут выполнить электронные приборы, повышая при этом ресурс аппарата и его надежность. Это значение можно довести до номинального тока, при этом нельзя забывать, что весь ряд номинальных токов охватить невозможно. Токи свыше номинальных, недопустимые перегрузки и КЗ лучше всего отключать гальва-

нической развязкой. В реальной эксплуатации выключатель коммутирует в основном токи от нуля до номинального, срабатывание выключателя при воздействии токов КЗ происходит крайне редко, если это, конечно, не специализированная цепь постоянного тока (например, цепь испытательной установки, где имитируются токи КЗ). Поэтому для увеличения ресурса выключателя в целом следует повышать коммутационный ресурс отключения токов от нуля до номинального. Для улучшения потребительских свойств выключателя в идеальном случае было бы хорошо, если бы механический ресурс аппарата совпадал с его коммутационным ресурсом, независимо от того, какие токи он отключает. Это, в свою очередь, даст увеличение межремонтного промежутка и снижение объема работ по обслуживанию выключателя. Здесь наиболее перспективными являются выключатели-гибриды постоянного тока на управляемых полупроводниковых элементах.

Существует множество способов создания гибридных аппаратов, несмотря на это, сегодня надежный в эксплуатации гибридный аппарат отсутствует [15–18]. Из схемотехнических решений гибридных аппаратов видно, что внедрение в схему дополнительных элементов или узлов влечет за собой очередные проблемы, которые увеличивают вероятность отказов работы аппаратов и не позволяют их применять в этом виде в эксплуатации [19, 20]. Упрощенная схема аппарата, приведенная на рис. 2, в этом смысле заслуживает внимания и является наиболее совершенной для решения поставленных задач.

Для основной схемы аппарата была принята гибридная схема с отключением токов от нуля до номинального путем увеличения сопротивления с помощью мощных транзисторов и одновременным отведением индуктивной энергии цепи в батарею варисторов. Для отключения токов перегрузок и КЗ применяется дугогасительная камера с деионной решеткой, камера оснащена последовательным магнитным дутьем.

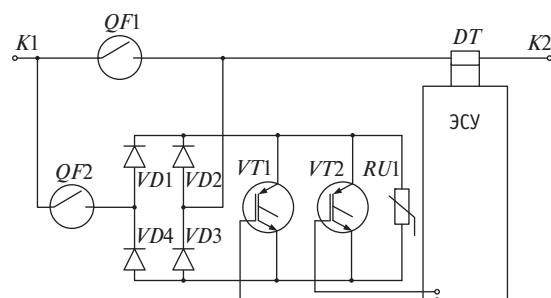


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема гибридного выключателя: K_1, K_2 — выводы выключателя; QF_1 — главные контакты выключателя с дугогасительной камерой; QF_2 — контактор для подключения модуля отключения тока; VD_1, VD_2, VD_3, VD_4 — сильноточные диоды; VT_1, VT_2 — сильноточные транзисторы; RUI — варистор; $\mathcal{E}SU$ — электронная система управления; DT — датчик тока

Работает выключатель следующим образом. В рабочем режиме главные контакты QF_1 замкнуты, контактор QF_2 разомкнут, и модуль отключения тока не работает. При появлении тока КЗ датчик тока DT фиксирует аварийный режим и выдает сигнал на отключение, главные контакты QF_1 расходятся, дуга под воздействием магнитного дутья загоняется в деионную

решетку и гаснет. Иная ситуация возникает, если ток в цепи не превышает номинального. При подаче сигнала на отключение вначале замыкается контактор QF_2 , открываясь транзисторы VT_1 и VT_2 . Ток начинает течь через выпрямительный мост и через транзисторы VT_1 и VT_2 , шунтируя главные контакты QF_1 . После этого подается команда на размыкание главных контактов QF_1 , они размыкаются, при этом дуга не образуется, так как контакты зашунтированы. Затем транзисторы VT_1 и VT_2 начинают увеличивать сопротивление проходящему через них току. Подобное явление аналогично зажиганию дуги на контактах. При повышении сопротивления транзисторов на них увеличивается напряжение. Для сброса излишней энергии сети параллельно выводам транзисторов подключен варистор RU_1 . При определенном напряжении варистор RU_1 резко уменьшает сопротивление, снимая излишнюю энергию сети и превращая ее в тепло. После снижения тока до нуля и полного закрытия транзисторов контактор QF_2 размыкается, и модуль отключения тока выключается, главные контакты разомкнуты без горения дуги. Цепь постоянного тока разомкнута с видимыми разрывами.

В результате проведенных экспериментов и подбора необходимых полупроводниковых элементов были получены неплохие результаты, которые показывают, что данная разработка может быть применена в промышленном масштабе. Для надежной работы диодов выпрямительного моста VD_1 – VD_4 в схему были введены дополнительные RC -цепочки, подключенные параллельно диодам, что дает значительное снижение напряжения при коммутации, а для надежной работы самого диодного моста был введен варистор параллельно входу модуля отключения тока. Для стабильного функционирования транзисторов во всех режимах аппарата в схему дополнительно введена параллельно силовому входам RC -цепочка, активное сопротивление которой зашунтировано диодом.

Электронная система управления выключателем при эксплуатации должна обеспечивать достаточно сложные алгоритмы работы, поэтому работой выключателя управляет микропроцессор, и при внесении в его программу изменений появилась возможность управлять с его помощью и работой модуля отключения тока. Для изолирования выводов управления полупроводникового модуля от выводов ЭСУ была введена полная гальваническая развязка на оптопарах. Для сброса энергии сети был подобран варистор с порогом включения в работу 800 В, транзисторы и диоды моста имеют номинальное напряжение 1500 В. Такое схемотехническое решение (см. рис. 2) стало основой разработки гибридного АБВ, предназначенного для защиты цепей постоянного тока подвижного состава ГЭТ с номинальным напряжением 550 В, номинальным током 250 А и отсутствием критических токов, в котором коммутационный ресурс равен механическому.

На рис. 3 представлена структурная схема гибридного выключателя ВБ 15, построенная на основе электромеханического выключателя ВБ-7 (000 «Технос») с полупроводниковым модулем отключения тока, которая позволяет из определенных модулей создавать разные типы исполнения выключателей на разные номинальные напряжения и ряды тока для различных условий работы по требованиям заказчика [21–23]. При этом

номинальный коммутационный ресурс повысился практически до механического, даже более, так как дуга в камере при отключении тока до номинального значения не горела, одновременно была решена проблема критических и неотключаемых токов. Кроме того, появляется возможность решать задачу отключения токов перегрузки величиной до $2I_{\text{ном}}$ полупроводниковым блоком.

Ниже приведены краткие пояснения важных блоков выключателя ВБ 15, а исчерпывающую информацию по этому аппарату можно получить в [23].

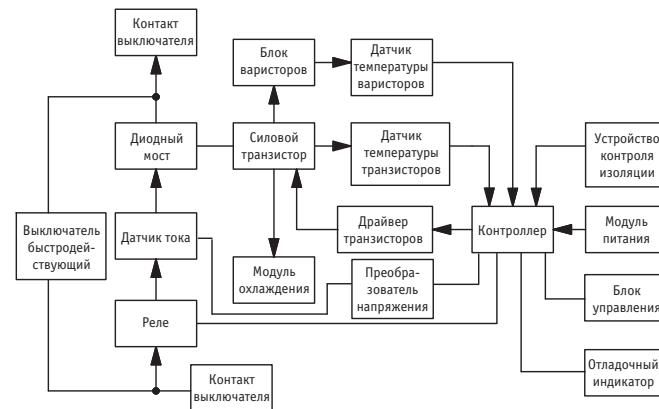


Рис. 3. Структурная схема гибридного выключателя ВБ 15-250/6

Модуль питания обеспечивает низковольтное питание выключателя и служит для формирования требуемых уровней напряжений, а также для защиты входов и выходов станции управления от перенапряжений, которые могут возникнуть в цепях питания собственных нужд троллейбуса, либо от катушки электромеханического выключателя в момент отключения или в той ситуации, когда включающий ток в этой же катушке переходит в режим удерживающего тока, т.е. в предвключенное положение электромеханического выключателя. Устройство контроля изоляции измеряет текущее сопротивление изоляции в той цепи, где аппарат установлен, и передает ее значение в контроллер. Блок управления обеспечивает вход УЗО (устройство защитного отключения) и РМН (реле минимального напряжения), в том числе и подачу питания +24 В и –24 В, кроме того, имеющийся в этом блоке интерфейс обмена информацией со станцией управления выключателя позволяет устанавливать его в кабину водителя троллейбуса. Работа отладочного индикатора заключается в фиксировании количества сработок по коммутационному и механическому ресурсам, а кроме того — некоторых эксплуатационных данных («черный ящик»). Контроллер, или головной модуль, управляет всеми модулями выключателя. Он принимает сигналы с датчиков тока, датчиков температур, датчиков напряжений, опрашивает их через определенные промежутки времени на случай обрыва связи, реализует протокол помехозащищенного обмена информацией, хранит в себе статистическую информацию о времени работы выключателя, отключаемых токах, их направлении, времени гашения, израсходованном коммутационном и механическом ресурсе, выдает информацию на пульт управления о какой-либо неисправности

в кабину водителю. Также головной блок имеет часы реального времени и энергонезависимую память для ведения протоколов работы. Датчик температуры варисторов измеряет температуру варисторов и передает информацию в контроллер. Датчик температуры транзисторов измеряет температуру транзисторов и передает информацию в контроллер. Датчики температуры транзисторов и варисторов построены на одном и том же принципе. Основу датчика температуры транзисторов составляет контроллер, который оцифровывает сигнал с контактного датчика температуры силовых транзисторов. Драйвер транзисторов формирует необходимые управляющие сигналы для коммутации транзистора. Преобразователь напряжения принимает сформированный сигнал с датчика тока и передает, преобразуя, в контроллер для управления выключателем.

Блок варисторов, или блок ограничений, перенапряжений, защищает силовой транзистор от перенапряжений, возникающих при его коммутации, поглощает индуктивную энергию при закрывании силовых транзисторов и состоит из последовательно-параллельно соединенных супрессоров и токовыравнивающих резисторов. Силовой транзистор, работающий в режиме ключа, осуществляет коммутацию индуктивного малого тока до номинального тока включительно и супрессорами защищен от статического электричества. Модуль охлаждения стабилизирует параметры силового транзистора и охлаждает его путем передачи тепла через радиаторы. Диодный мост выпрямляет отключаемый малый ток, так как направление тока в неполяризованном выключателе может быть любым. Датчик тока основан на эффекте Холла — измеряет текущий по выключателю ток и передает информацию в контроллер через преобразователь напряжения. Реле осуществляет гальваническую развязку между контактами выключателя и коммутируется в бестоковом режиме. Выключатель быстродействующий выполняет функцию основного проводника тока и защитного устройства от КЗ и перегрузки, а также обеспечивает гальваническую развязку с двумя видимыми разрывами. Контакт выключателя — силовые контакты быстродействующего выключателя. Алгоритм программы одного из возможных вариантов работы микропроцессорного датчика тока на базе микропроцессора ATMEGA 8515 состоит из многочисленных операций: переход на фрагмент инициализации устройства, фрагмент первоначальной инициализации микропроцессора, обмен информацией с аналого-цифровым преобразователем, считывание битов, сравнение данных АЦП с уставками, формирование импульса сброса ошибки при соответствии результатов измерения уставкам и т.д. В измерительном узле датчика тока также может использоваться микроконтроллер AT89S51-24PU. Текст программы на ассемблере для этого микроконтроллера тоже показал себя жизнеспособным.

Изготовленный модуль отключения тока продемонстрировал прекрасные результаты при испытаниях на реальной коммутационной установке, в качестве примера на рис. 4 приведены осциллограммы напряжения на контактах выключателя

при отключении тока модулем. Испытанный вариант выключателя показал полное отсутствие критического тока, малое время отключения малых и номинальных токов при различных напряжениях, токах и индуктивностях коммутируемой цепи. В настоящее время идет конструкторская разработка выключателя для уменьшения его габаритов, в частности, изменения должны коснуться дугогасительной камеры и магнитного дутья, так как камера будет предназначена для отключения токов, превышающих номинальные. Полупроводниковый модуль отключения тока в настоящее время проходит испытания на ресурс и надежность.

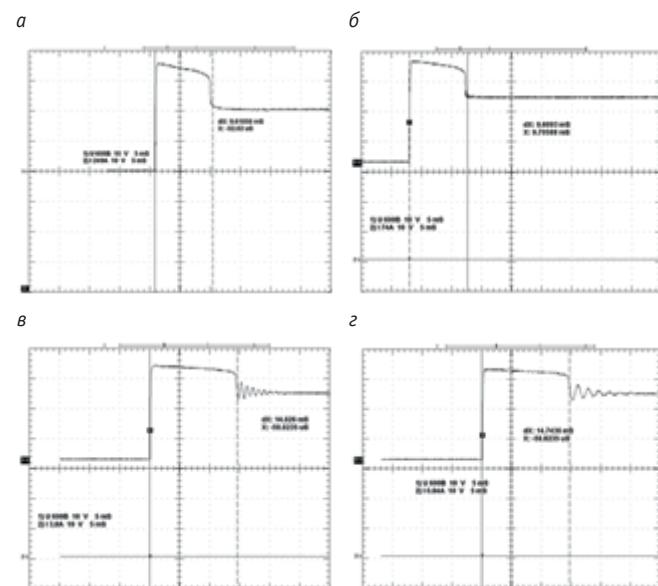


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на контактах выключателя при отключении тока электронным модулем:

а — номинальное напряжение 600 В; коммутируемый ток 249 А; индуктивность цепи 0,087 Гн; $L/R = 0,00803$ с; максимальное перенапряжение 800 В; полное время отключения тока 9,7 мс;
б — номинальное напряжение 600 В; коммутируемый ток 74 А; индуктивность цепи 0,087 Гн; $L/R = 0,00803$ с; максимальное перенапряжение 800 В; полное время отключения тока 9,7 мс;
в — номинальное напряжение 600 В; коммутируемый ток 3,8 А; индуктивность цепи 2,76 Гн; $L/R = 0,01312$ с; максимальное перенапряжение 800 В; полное время отключения тока 14,6 мс;
г — номинальное напряжение 600 В; коммутируемый ток 0,84 А; индуктивность цепи 11,97 Гн; $L/R = 0,01264$ с; максимальное перенапряжение 800 В; полное время отключения тока 14,7 мс

В заключение следует отметить, что гибридный выключатель ВБ 15, изготовленный на базе выключателя ВБ 7/2-250/6, стал дороже базового аппарата примерно на 10 %. Однако при сравнении этого аппарата с ВБ 13 [10, 13] удорожание составило не более 5 %. Увеличение номинального коммутационного ресурса с 5000 до 150 000 ВО и исключение неотключаемых токов, да и критических токов, того стоит.

Литература

- ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М. : Изд-во стандартов, 1982. 8 с.
- Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3-х т. Т. 1. / 8-е изд., перераб. и доп. ; под ред. И. Н. Жестковой. М. : Машиностроение, 2001. 920 с.
- Мышкин Н. К., Кончин В. В., Браунович М. Электрические контакты. М. : Интеллект, 2008. 560 с.
- Намитоков К. К. Электроэррозионные явления. М. : Энергия, 1978. 456 с.
- ГОСТ 2585-88. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 1988. 29 с.
- ГОСТ 9219-88. Аппараты электрические тяговые. Общие технические требования. М. : Изд-во стандартов, 1988. 33 с.
- Мурадов Э. Ш., Грицук А. А. Автоматические быстродействующие выключатели для трамваев. Екатеринбург : Астра, 2006. 234 с.
- Выключатель автоматический : пат. на промышленный образец 76376 Российская Федерация.
- Мурадов Э. Ш. Быстродействующие выключатели ООО «Технос». Ч. 1. Екатеринбург : Полиграфист, 2008. 260 с.
- Мурадов Э. Ш. Быстродействующий автоматический выключатель для повышения электробезопасности городского электротранспорта // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 1. ISSN 1995-5685.
- Выключатель быстродействующий автоматический постоянного тока : пат. 2310945 Российская Федерация.
- Выключатель автоматический быстродействующий : пат. 2356121 Российская Федерация.
- Грицук А. А., Мурадов Э. Ш. Силовые электромагнитные механизмы в быстродействующих выключателях. Екатеринбург : Банк культурной информации, 2014. 316 с.
- Мурадов, Э. Ш., Грицук А. А. Быстродействующие выключатели ООО «Технос». Ч. 2. Екатеринбург : Сред.-Урал. кн. изд-во, 2008. 264 с.
- Могилевский Г. В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1986.
- Электрические и электронные аппараты : учебник / Под ред. Ю. К. Розанова. М. : Энергоатомиздат, 1998.
- Способ управления гибридным коммутационным аппаратом и гибридный коммутационный аппарат для его осуществления : пат. 2267184 Российская Федерация.
- Гибридный коммутационный аппарат постоянного тока : пат. 2214645 Российская Федерация.
- Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М. : Додэка-XXI, 2001. 384 с.
- Криштафович А. К. Промышленная электроника : учебник / 2-е изд., перераб и доп. М. : Высшая школа, 1984. 351 с.
- Способ отключения постоянного тока гибридным коммутационным устройством постоянного тока и гибридное коммутационное устройство постоянного тока для осуществления этого способа : пат. 2375779 Российская Федерация.
- Усовершенствованное гибридное коммутационное устройство постоянного тока : пат. 2382434 Российская Федерация.
- Мурадов Э. Ш., Шипицын В. В. Электроника в быстродействующих выключателях. Екатеринбург : Полиграфист, 2005. 256 с.

References

- GOST 25142-82. Sherokhovatost poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki [GOST 25142-82. Surface roughness. Parameters and characteristics]. M. : Izd-vo standartov, 1982. 8 s.
- Anuryev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroyatelya : v 3-kh t. T. 1 [Reference book for mechanical engineers and designers in three books. Vol. 1] / 8-e izd., pererab. i dop. ; pod red. I. N. Zhestkovoy. M. : Mashinostroenie, 2001. 920 s.
- Myshkin N. K., Konchin V. V., Braunovich M. Elektricheskie kontakty [Electrical contacts]. M. : Intellekt, 2008. 560 s.
- Namitokov K. K. Elektroerzionnye yavleniya [EDM phenomenon]. M. : Energiya, 1978. 456 s.
- GOST 2585-88. Vyklyuchateli avtomaticheskie bystrodeystvuyushchie postoyannogo toka. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST 2585-88. Quick-break DC circuit breakers. General specifications]. M. : Izd-vo standartov, 1988. 29 s.
- GOST 9219-88. Apparaty elektricheskie tyagovye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST 9219-88. Electrical traction devices. General specifications]. M.: Izd-vo standartov, 1988. 33 s.
- Muradov E. Sh., Gritsuk A. A. Avtomaticheskie bystrodeystvuyushchie vyklyuchateli dlya tramvaev [Quick-break circuit breakers for trams]. Ekaterinburg : Astra, 2006. 234 s.
- Vyklyuchatel avtomaticheskiy [Circuit breaker] : pat. na promyshlenny obrazets 76376 Rossiyskaya Federatsiya.
- Muradov E. Sh. Bystrodeystvuyushchie vyklyuchateli 000 «Tekhnos». Ch. 1 [Quick-break circuit breakers. LLC Technos. Part 1]. Ekaterinburg : Poligrafist, 2008. 260 s.
- Muradov E. Sh. Bystrodeystvuyushchiy avtomaticheskiy vyklyuchatel dlya povysheniya elektrobezopasnosti gorodskogo elektrotransporta [Quick-break circuit breaker to improve electrical safety of urban electric transport] // ELEKTRON. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost. 2014. № 1. ISSN 1995-5685.
- Vyklyuchatel bystrodeystvuyushchiy avtomaticheskiy postoyannogo toka [Quick-break DC circuit breaker] : pat. 2310945 Rossiyskaya Federatsiya.
- Vyklyuchatel avtomaticheskiy bystrodeystvuyushchiy [Quick-break circuit breaker] : pat. 2356121 Rossiyskaya Federatsiya.
- Gritsuk A. A., Muradov E. Sh. Silovye elektromagnitnye mekhanizmy v bystrodeystvuyushchikh vyklyuchatelyakh [Power electromagnetic mechanisms in quick-break circuit breakers]. Ekaterinburg : Bank kulturnoy informatsii, 2014. 316 s.
- Muradov E. Sh., Gritsuk A. A. Bystrodeystvuyushchie vyklyuchateli 000 «Tekhnos». Ch. 2 [Quick-break circuit breakers. LLC Technos. Part 2]. Ekaterinburg : Sred.-Ural. kn. izd-vo, 2008. 264 s.
- Mogilevsky G. V. Gibridnye elektricheskie apparaty nizkogo napryazheniya [Low voltage hybrid electric vehicles]. M. : Energoatomizdat, 1986.
- Elektricheskie i elektronnye apparaty : uchebnik [Electrical and electronic equipment : a textbook] / Pod red. Yu. K. Rozanova. M. : Energoatomizdat, 1998.
- Sposob upravleniya gibridnym kommutatsionnym apparatom i gibridny kommutatsionnyy apparat dlya ego osushchestvleniya [Method for controlling a hybrid switching device and a hybrid switching device for its implementation] : pat. 2267184 Rossiyskaya Federatsiya.
- Gibridny kommutatsionnyy apparat postoyannogo toka [Hybrid electric DC switching device] : pat. 2214645 Rossiyskaya Federatsiya.
- Voronin P. A. Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semeystva, kharakteristiki, primenenie / [Power semiconductor switches: series, characteristics, application]. M. : Dodeka-XXI, 2001. 384 s.
- Krishtafovich A. K. Promyshlennaya elektronika : uchebnik [Industrial electronics : a textbook] / 2-e izd., pererab i dop. M. : Vysshaya shkola, 1984. 351 s.
- Sposob otklyucheniya postoyannogo toka gibridnym kommutatsionnym ustroystvom postoyannogo toka i gibridnoe kommutatsionnoe ustroystvo postoyannogo toka dlya osushchestvleniya etogo sposoba [A method of interruption of DC current using hybrid DC switching device and hybrid DC switching device to implement this method] : pat. 2375779 Rossiyskaya Federatsiya.
- Usovershenstvovannoe gibridnoe kommutatsionnoe ustroystvo postoyannogo toka [Improved hybrid DC switching device] : pat. 2382434 Rossiyskaya Federatsiya.
- Muradov E. Sh., Shipitsin V. V. Elektronika v bystrodeystvuyushchikh vyklyuchatelyakh [Electronics in high-speed switches]. Ekaterinburg : Poligrafist, 2005. 256 s.

УДК 621.332:3 (07)

Юрий Александрович Кочунов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО КРОНШТЕЙНА ПРОВОДОВ ДЛЯ ЛИНИЙ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Yuriy Alexandrovich Kochunov, Senior Lecturer, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Analysis of the strength of glass-fiber wire bracket for longitudinal power lines

Аннотация

В статье приведены результаты расчетов на прочность кронштейна, выполненного из стеклопластика. Рассмотрены варианты перемещения точки крепления тяги к траверсе. Выполнен анализ влияния статических и динамических нагрузок на прочность конструкции, прогиб и угол поворота в сечении крепления проводов.

Ключевые слова: кронштейны проводов, композитный материал (стеклопластик), стеклопластиковый профиль, проекция реакции тяги, траверсы, опоры, прогиб, статическая нагрузка, динамическая нагрузка, изгибающий момент, прочность.

Summary

The paper presents the results of strength analysis of the bracket made of fiberglass. Options for moving the rod attachment point to the beam are considered. The effect of static and dynamic loads on the structural strength, deflection and rotation angle in wire fixing section is analyzed.

Keywords: wire brackets, composite material (fiberglass), fiberglass profile, projection of rod reaction, beams, supports, deflection, static load, dynamic load, bending moment, strength.

Известно, что эффективная работа предприятий определяется экономическими показателями, тесно связанными с необходимостью использования материалов, обеспечивающих надежную и безотказную работу технических устройств. В современных электрических системах при создании и развитии технических устройств научно-технические решения являются приоритетными. К одному из таких решений можно отнести применение композитных материалов в опорных и поддерживающих конструкциях электрифицированных железных дорог. В статье приведен аналитический расчет прочности стеклопластикового кронштейна проводов линий продольного электроснабжения.

Цель расчета заключается в определении прочности и прогиба траверсы:

при наиболее тяжелых условиях эксплуатации;

при варьировании расстояния точки крепления тяги относительно точки крепления второго провода.

Расчет производим для кронштейна СИП-3 (рис. 1), выполненного по типовому проекту [1].

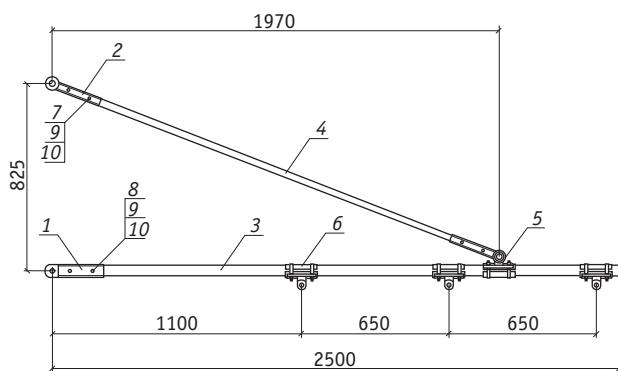


Рис. 1. Кронштейн СИП-3:
 1 — оконцеватель траверсы; 2 — оконцеватель тяги; 3 — траверса;
 4 — тяга; 5 — ушко шарнирного горизонтального стержня консоли;
 6 — вкладыш; 7 — болт M6×50; 8 — болт M6×70;
 9 — гайка M6; 10 — шайба M6

Кронштейн проводов не имеет изоляторов, так как выполнен из изоляционного материала. Крепление проводов осуществляется в седла, которые через хомуты крепятся непосредственно к профилю [2, 3].

Для расчета составляем схему кронштейна с указанием размеров и точек действия нагрузок (рис. 2, табл. 1).

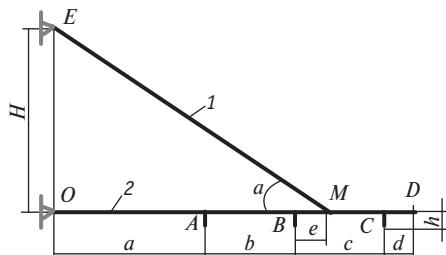


Рис. 2. Схема кронштейна:

1 — тяга; 2 — траверса; O и E — точки крепления кронштейна к опоре; A, B, C — точки крепления проводов или точки действия нагрузок силы тяжести проводов G_1, G_2, G_3 соответственно

Таблица 1

Основные размеры и величины сил тяжести

$a, \text{м}$	$b, \text{м}$	$e, \text{м}$	$c, \text{м}$	$d, \text{м}$	$H, \text{м}$	$h, \text{м}$	$G_i, \text{кН}$	$\alpha, {}^\circ$
1,1	0,65	0,22	0,65	0,1	0,825	0,1	2,0	22,723

На узел крепления проводов будут действовать сила тяжести от веса провода с гололедом и сила аэродинамического сопротивления ветровому потоку, которая в задаче принимается 30 % от силы тяжести [4], т.е.

$$F_{rw} = 0,3 \cdot G. \quad (1)$$

Результирующая сила, воспринимаемая каждым креплением проводов, равна

$$F = \sqrt{G^2 + F_{rw}^2}. \quad (2)$$

Для того чтобы оценить аналитическую величину воздействия сил на кронштейн, составляем схему реакций, возникающих в конструкции (рис. 3).

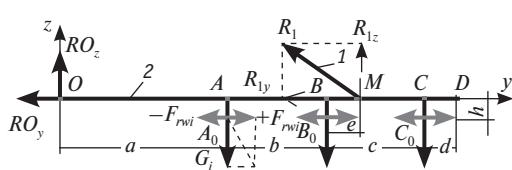


Рис. 3. Схема реакций:

G_i — силы тяжести каждого i -го провода ($i = 1, 2, 3$);
 F_{rw1} — сила аэродинамического сопротивления ($i = 1, 2, 3$); R_1 — реакция наклонно расположенной тяги; R_{1y} — проекция реакции тяги на ось O_y ; R_{1z} — проекция реакции тяги на ось O_z ; RO_y — проекция реакции опоры O траверсы на ось O_y ; RO_z — проекция реакции опоры O траверсы на ось O_z .

Расчет проекций реакций тяги и опоры выполняем по следующим формулам:

$$R_{1z} = \frac{1}{OM} \cdot [G_1 \cdot a + G_2 \cdot (a+b) + G_3 \cdot (a+b+c) \pm 3 \cdot F_{rw} \cdot h]; \quad (3)$$

$$RO_z = G_1 + G_2 + G_3 - R_{1z}; \quad (4)$$

$$R_{1y} = \frac{R_{1z}}{\operatorname{tg} \alpha}; \quad (5)$$

$$R_1 = \sqrt{R_{1y}^2 + R_{1z}^2}; \quad (6)$$

$$RO_y = F_{rw1} + F_{rw2} + F_{rw3} - R_{1y}; \quad (7)$$

$$RO_{1y} = |RO_y|; \quad (8)$$

$$RO_1 = \sqrt{RO_y^2 + RO_z^2}. \quad (9)$$

Далее, используя метод начальных параметров, производим расчет по вычислению прогиба и углов поворота в различных точках сечения траверсы.

Определяем сосредоточенные моменты, приложенные в точках подвеса проводов на траверсе:

$$M_1 = F_{rw} \cdot h; \quad (10)$$

$$M_2 = M_3 = M_1. \quad (11)$$

Для стеклопластикового кронштейна, согласно [5], приводим основные физико-геометрические характеристики: модуль упругости $E = 40 \cdot 10^6 \text{ кПа}$, диаметр тяги $d_1 = 25 \text{ мм}$, диаметр траверсы принимаем $d_2 = 64 \text{ мм}$, так как при использовании меньшего диаметра расчет на прочность не проходит — требуется дополнительная тяга.

Площадь поперечного сечения и момент инерции определяем по формулам из [6]. Жесткость стержня обозначим через T :

$$T = E \cdot J_{xx}. \quad (12)$$

Начальный прогиб траверсы при $y = a + b + e$:

$$\theta O = \frac{-1}{T \cdot y} \cdot \left[M_1 \cdot \frac{(a-y)^2}{2} + M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^2}{2} + R_{1z} \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^3}{6} \right]. \quad (13)$$

Прогиб и угол поворота в сечении A траверсы при $y = a$:

$$\theta A = \theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left(RO_z \cdot \frac{y^3}{6} \right); \quad (14)$$

$$\theta A = \theta O + \frac{1}{T} \cdot \left(RO_z \cdot \frac{y^2}{2} \right). \quad (15)$$

Прогиб и угол поворота в сечении B траверсы при $y = a + b$:

$$zB = \theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left(M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \right); \quad (16)$$

$$\theta B = \theta O + \frac{1}{T} \cdot \left(M_1 \cdot (y-a) + RO_z \cdot \frac{y^2}{2} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} \right). \quad (17)$$

Прогиб и угол поворота в сечении C траверсы при $y = a + b + c$:

$$zC = \theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left[M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \cdot M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^2}{2} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^3}{6} + R_{l_z} \cdot \frac{[y-(a+b+e)]^3}{6} \right]; \quad (18)$$

$$\theta C = \theta O + \frac{1}{T} \cdot \left[M_1 \cdot (y-a) + RO_z \cdot \frac{y^2}{2} - G_1 \times \frac{(y-a)^2}{2} \cdot M_2 \cdot [y-(a+b)] - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^2}{2} + R_{l_z} \cdot \frac{[y-(a+b+e)]^2}{2} \right]. \quad (19)$$

Необходимо выполнить проверку $zM = 0$, при этом $y = a + b + e$:

$$zM = \theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left[M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \cdot M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^2}{2} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)]^3}{6} \right]. \quad (20)$$

Вычислим расчетное напряжение при растяжении тяги:

$$\sigma_p = \frac{R_l}{A_1}, \quad (21)$$

где A_1 — площадь поперечного сечения тяги, м^2 .

Расчетное напряжение при статической нагрузке не должно, согласно [7, 8], превышать допустимое значение $\sigma_{\text{доп}} = 800 \text{ МПа}$ или $\sigma_{\text{доп}} = 80 \cdot 10^3 \text{ кПа}$.

При воздействии динамической нагрузки напряжение при растяжении находим как

$$\sigma_{p,d} = \frac{k_d R_l}{A_1}, \quad (22)$$

где k_d — коэффициент динамической нагрузки (учет внезапного возникновения вертикальных и поперечных колебаний проводов).

Расчетное напряжение при растяжении с учетом динамической нагрузки должно быть меньше $\sigma_d = 60 \cdot 10^3 \text{ кПа}$, т.е. в 1,3 раза меньше, чем при воздействии допустимого значения статической нагрузки $\sigma_{\text{доп}}$ [7, 8].

Аналогично рассчитываем на прочность траверсу,рабатывающую на сжатие при статической и динамической нагрузках:

$$\sigma_{c,k} = \frac{RO_{l_y}}{A_2}, \quad (23)$$

где A_2 — площадь поперечного сечения траверсы, м^2 ;

$$\sigma_{c,j,d} = \frac{k_d RO_{l_y}}{A_2}. \quad (24)$$

Расчетное напряжение при сжатии траверсы с учетом статической нагрузки не должно превышать $\sigma_{c,j,\text{доп}} = 250 \text{ МПа}$ или $\sigma_{c,j,\text{доп}} = 25 \cdot 10^3 \text{ кПа}$. С учетом динамической нагрузки $\sigma_{c,j,d} \leq 19 \cdot 10^3 \text{ кПа}$ [8, 9].

Вычислим перерезывающую силу и изгибающий момент. Кронштейн делится на четыре участка, как показано на рис. 4.

Первый участок перерезывающей силы находим как

$$QI_z(y_1) = RO_z, \quad (25)$$

где y_1 принимаем равным a , м.

Изгибающий момент (как внутренний силовой фактор) определяем следующим образом:

$$MI_z(y_1) = RO_z \cdot y_1; \quad (26)$$

$$MI_z(y_1) = RO_z \cdot a; \quad (27)$$

$$MI_z(y_0_1) = 0, \quad (28)$$

где $y_0_1 = 0$.

Второй участок:

$$QII_z(y_2) = RO_z - G_1, \quad (29)$$

где y_2 принимаем равным b , м;

$$MII_z(y_2) = RO_z \cdot (a + y_2) - G_1 \cdot y_2 - M_1; \quad (30)$$

$$MII_z(y_0_2) = RO_z \cdot a - M_1, \quad (31)$$

где $y_0_2 = 0$;

$$MII_z(y_2) = RO_z \cdot (a + b) - G_1 \cdot b - M_1. \quad (32)$$

Третий участок:

$$QIII_z(y_3) = RO_z - G_1 - G_2, \quad (33)$$

где y_3 принимаем равным e , м;

$$M_{III_z}(y_3) = RO_z \cdot (a + b + y_3) - G_1 \cdot (b + y_2) - M_1 - G_2 \cdot y_3 - M_2; \quad (34)$$

$$M_{III_z}(y_3) = RO_z \cdot (a + b + e) - G_1 \cdot (b + e) - M_1 - G_2 \cdot e - M_2; \quad (35)$$

$$M_{III_z}(y_0_3) = RO_z \cdot (a + b) - G_1 \cdot b - M_1 - M_2, \quad (36)$$

где $y_0_3 = 0$.

Четвертый участок:

$$QIV_z(y_4) = G_3, \quad (37)$$

где y_4 принимаем равным $c - e$, м;

$$MIV_z(y_4) = -G_3 \cdot y_4 + M_3; \quad (38)$$

$$MIV_z(y_0_4) = M_3, \quad (39)$$

где $y_0_4 = 0$;

$$MIV_z(y_4) = -G_3 \cdot (c - e) + M_3. \quad (40)$$

На основании расчета строим схему приложения сил на кронштейн, эпюры перерезывающих сил и изгибающего момента в сечении траверсы (см. рис. 4).

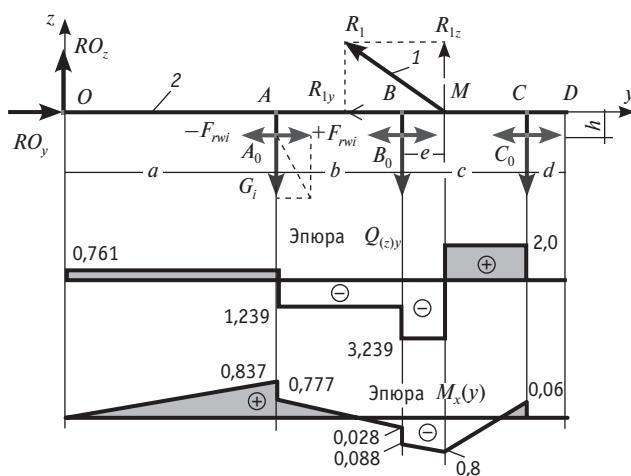


Рис. 4. Схема приложения сил, эпюры перерезывающих сил и изгибающего момента

Выполняем расчет на прочность траверсы, работающей на изгиб со сжатием.

Определяем наибольший изгибающий момент, который появляется в точке A подвеса первого провода:

$$M_{max} = MI_z(y_1). \quad (41)$$

Рассчитываем момент сопротивления сечения траверсы изгибу:

$$W_x = 10^{-12} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^3}{32}, \quad (42)$$

где d_2 — диаметр траверсы, мм.

Изгибающее напряжение в сечении траверсы от воздействия изгибающего момента при статической нагрузке находим по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{max}}{W_x}. \quad (43)$$

Согласно [8, 9], $\sigma_{изг}$ не должно превышать допустимого значения $\sigma_{доп} = 80 \cdot 10^3$ кПа.

Изгибающее напряжение в сечении траверсы от воздействия изгибающего момента при динамической нагрузке определяем как

$$\sigma_{изг.д} = \frac{k_d M_{max}}{W_x}. \quad (44)$$

При динамической нагрузке $\sigma_{изг.д}$ должно быть в 1,3 раза меньше, чем $\sigma_{доп}$, т.е. $\sigma_{изг.д} \leq 60 \cdot 10^3$ кПа [8, 9].

Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при статической нагрузке находим следующим образом:

$$\sigma_{экв} = \sigma_{сж} + \sigma_{изг}. \quad (45)$$

Значение эквивалентного напряжения при статической нагрузке должно удовлетворять соотношению $\sigma_{экв} \leq \sigma_{доп}$, т.е. $\sigma_{экв} \leq 80 \cdot 10^3$ кПа [8, 9].

Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при динамической нагрузке определяем как

$$\sigma_{экв.д} = \sigma_{сж.д} + \sigma_{изг.д}. \quad (46)$$

Значение эквивалентного напряжения при динамической нагрузке должно удовлетворять условию $\sigma_{экв.д} \leq \sigma_{доп}/1,3$, т.е. $\sigma_{экв.д} \leq 60 \cdot 10^3$ кПа [8, 9].

Используя начальные условия $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i [4], по формулам (21)–(24), (43)–(46) рассчитываем напряжения (полученные данные приведены в табл. 2).

Таблица 2

Напряжения, возникающие в тяге и траверсе кронштейна СИП-3 при начальных условиях, кПа

σ_p	$\sigma_{p.д}$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{сж.д}$	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{изг.д}$	$\sigma_{экв}$	$\sigma_{экв.д}$
$27,63 \cdot 10^3$	$35,92 \cdot 10^3$	$3,329 \cdot 10^3$	$4,328 \cdot 10^3$	$32,54 \cdot 10^3$	$42,31 \cdot 10^3$	$35,87 \cdot 10^3$	$46,64 \cdot 10^3$

На основе представленной методики, используя программный продукт Mathcad, вычисляем прочность кронштейна СИП-3 при вариации расстояния e точки крепления тяги к траверсе. По полученным результатам строим графики зависимостей (рис. 5–16).

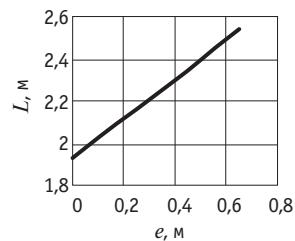


Рис. 5. Зависимость длины тяги от расстояния e

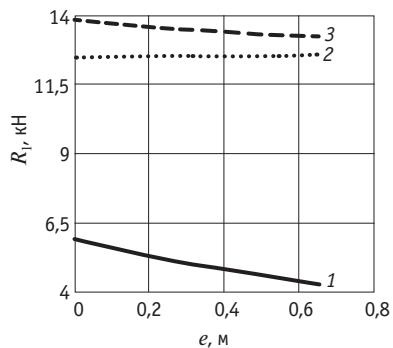


Рис. 6. Проекции реакций тяги:
1 — по оси Oz ; 2 — по оси Oy ;
3 — наклонно расположенной тяги

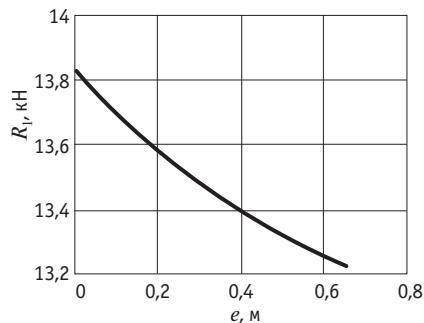


Рис. 7. Реакция в тяге

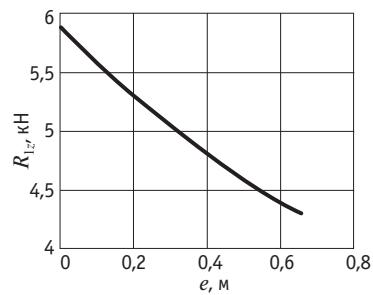


Рис. 8. Проекция реакции тяги по оси Oz

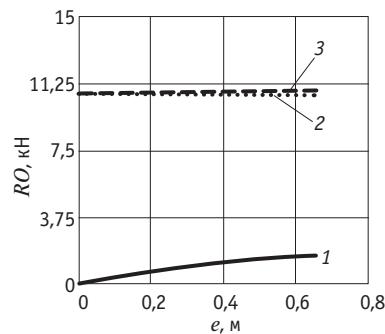


Рис. 9. Проекции реакций опоры на траверсу:
1 — по оси Oz ; 2 — по оси Oy ;
3 — реакций опоры

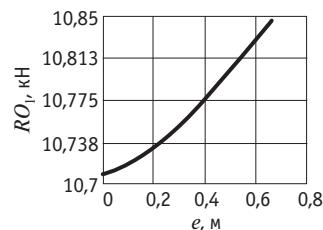


Рис. 10. Реакция опоры на траверсу

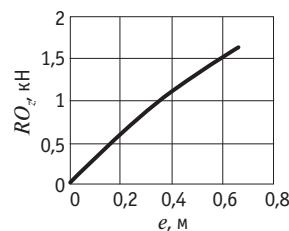


Рис. 11. Проекция реакции опоры на траверсу по оси Oz

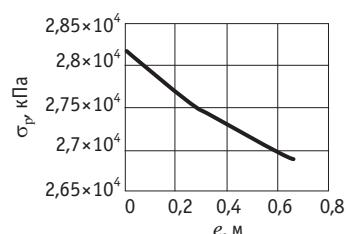


Рис. 12. Расчетное напряжение на растяжение тяги при статической нагрузке

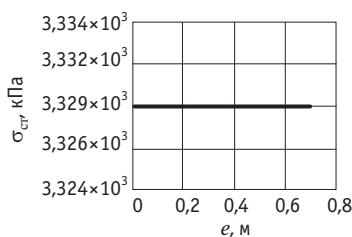


Рис. 13. Расчетное напряжение сжатия траверсы при статической нагрузке

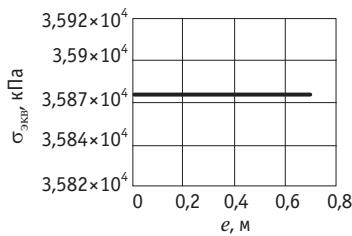


Рис. 14. Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при статической нагрузке

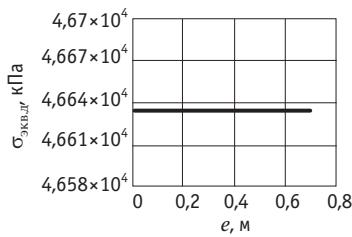


Рис. 15. Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при динамической нагрузке

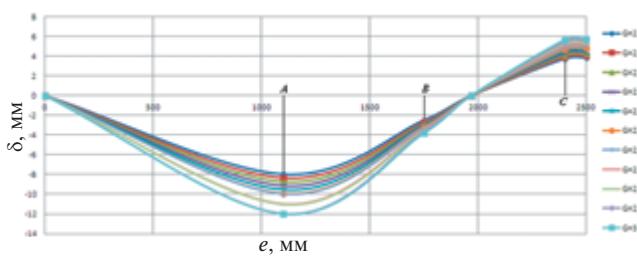


Рис. 16. Изменение прогиба траверсы в зависимости от сил тяжести проводов $G_i = 2,0$ кН при $F_{rw} = 0,3$

Так как нагрузка от силы тяжести проводов и аэродинамических сил может изменяться в зависимости от атмосферных условий, по изложенной методике с использованием метода конечных элементов рассчитываем прочность кронштейна в пределах действия силы тяжести от $G_i = 2; 2,1; 2,2 \dots 3$ кН и в пределах действия силы аэродинамического сопротивления $F_{rw} = 30\%; 40\%; 50\% \dots 100\%$ от G_i . По полученным результатам строим диаграмму зависимости (рис. 17).

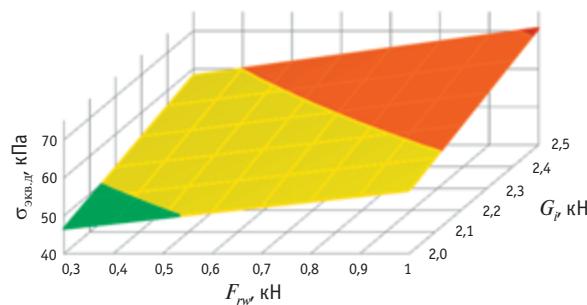


Рис. 17. Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при изменении сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} :

■ — 70–75; ■ — 60–70; ■ — 50–60; ■ — 40–50

ВЫВОДЫ

1. На основании результатов расчетов можно утверждать, что прочность кронштейна, выполненного из стеклопластика диаметром траверсы 64 мм и диаметром тяги 25 мм, при заданных исходных данных обеспечена. Воздействия статической и динамической нагрузок не превышают допустимых нормативных значений [7–9].

2. При варьировании расстояния точки крепления тяги к траверсе прочность конструкции соответствует нормативным требованиям [7–9].

3. Прогиб траверсы при $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i составляет 8 мм, что соответствует нормативным требованиям [10] и не превышает соотношение 1/150.

4. Прочность кронштейна проводов СИП-3, выполненного из стеклопластикового профиля круглого сечения диаметром тяги 25 мм и диаметром траверсы 64 мм, будет обеспечена в следующих пределах: при силе тяжести от каждого провода $G_i = 2,1$ кН и воздействии аэродинамической силы до $F_{rw} = 100\%$ от G_i , а также при силе тяжести $G_i = 2,5$ кН и воздействии $F_{rw} = 30\%$ от G_i .

Литература

1. НТ0-13-3320. Кронштейны из полимерных материалов. М. : ЦНИИС, 2013. 82 с.
2. Устройство крепления проводов линии электропередачи к опоре : пат. 133360 Российская Федерация.
3. Кочунов Ю. А. Применение композитных материалов для изготовления поддерживающих конструкций линий продольного электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 76–80. ISSN 1815-9400.
4. Программа и методика испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети electrified line catenary systems. М. : ЦНИИС, 2004.
5. ТУ 2296-001-90072575-2011. Стеклопластики профильные электроизоляционные [Электронный ресурс]. URL: http://www.shtein.ru/norma_list/list_tu_l.htm (дата обращения: 20.07.2014).
6. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1976. 608 с.
7. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Методы испытания на растяжение. М. : Изд-во стандартов, 1980.
8. ГОСТ 27380-87. Стеклопластики профильные электроизоляционные. Общие технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1987.
9. ГОСТ 4651-82. Пластмассы. Методы испытания на сжатие. М. : Изд-во стандартов, 1982.
10. СТН ЦЭ 141-99. Нормы проектирования контактной сети. М. : МПС России, 2001.

References

1. NTO-13-3320. Kronshteyny iz polimernykh materialov [NTO-13-3320. Brackets made of polymeric materials]. M. : TsNIIS, 2013. 82 s.
2. Ustroystvo krepleniya provodov linii elektroperedachi k opore [A device for fixing power line wires to the support] : pat. 133360 Rossiyskaya Federatsiya.
3. Kochunov Yu. A. Primenenie kompozitnykh materialov dlya izgotovleniya podderzhivayushchikh konstruktsiy linii prodolnogo elektronsnabzheniya [Application of composite materials for the production of supporting structures of longitudinal power lines] // Transport of the Urals. 2014. № 1 (40). S. 76-80. ISSN 1815-9400.
4. Programma i metodika ispytaniy na mehanicheskuyu prochnost uzlov i detalей kontaktnoy seti elektritsirsuemymkh dorog [Program and methods of testing the mechanical strength of parts and components of electrified line catenary systems]. M. : TsNIIS, 2004.
5. TU 2296-001-90072575-2011. Stekloplastiki profilnye elektroizolyatsionnye [TU 2296-001-90072575-2011. Section insulating glass-reinforced plastics]. [Electronic resource]. URL: http://www.shtein.ru/norma_list/list_tu_l.htm (date accessed: 20.07.2014).
6. Belyaev N. M. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. M. : Nauka, 1976. 608 s.
7. GOST 11262-80. Plastmassy. Metody ispytaniya na rastyazhenie [GOST 11262-80. Plastics. Tensile strength test methods]. M. : Izd-vo standartov, 1980.
8. GOST 27380-87. Stekloplastiki profilnye elektroizolyatsionnye. Obschchie tekhnicheskie usloviya [GOST 27380-87. Section insulating glass-reinforced plastics. General specifications]. M. : Izd-vo standartov, 1987.
9. GOST 4651-82. Plastmassy. Metody ispytaniya na szhatie [GOST 4651-82. Plastics. Compressive strength test methods]. M. : Izd-vo standartov, 1982.
10. STN TsE 141-99. Normy proektirovaniya kontaktnoy seti [STN CE 141-99. Catenary system design standards]. M. : MPS Rossii, 2001.

УДК 621.331: 621.311

Максим Алексеевич Гаранин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
 Светлана Александровна Блинкова, аспирант Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
 инженер службы электрификации и электроснабжения Куйбышевской дирекции инфраструктуры структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД»

РАСЧЕТ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И УСИЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Maxim Alexeyevich Garanin, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Railway Transport Power Supply, Samara State University of Railway Transport (SSURT), Svetlana Alexandrovna Blinkova, graduate student, Samara State University of Railway Transport (SSURT), Engineer, Department of Electrification and Power Supply, Kuibyshev Infrastructure Directorate of the Central Infrastructure Directorate unit — branch of JSC Russian Railways

Analysis of power supply status of transportation process and improvement of traction power system

Аннотация

Предложен вариант оценки энергообеспеченности перевозочного процесса с помощью коэффициента, показывающего кратность запаса энергообеспеченности участка для реализации требуемых размеров движения, а также коэффициента, определяющего энергообеспеченность участка. Предложен вариант экспресс-оценки энергообеспеченности участка по показателям нагрузочной способности с учетом инструкции по расчету наличной пропускной способности (2010 г.).

Разработан алгоритм выбора мероприятий по усилению системы тягового электроснабжения по постоянному и переменному току. Алгоритм позволяет определить варианты, обеспечивающие максимальный эффект по приведению показателей нагрузочной способности к нормативным значениям.

Ключевые слова: энергообеспеченность, пропускная способность, нагрузочная способность, методика усиления системы тягового электроснабжения.

Summary

A way to assess the power supply status of transportation process is proposed, which uses a factor indicating the multiplicity of power supply reserve of a line for implementation of the required traffic volume as well as the factor that determines the energy supply status of a line. A way to perform rapid assessment of power supply status of a line using load capacity indicators with account to the «Guidelines for analysis of available railway capacity» (2010) is considered.

An algorithm for selection of measures to improve traction power system for AC and DC options is developed. The algorithm allows to identify options to ensure maximum effect to bring load indicators to standard values.

Keywords: power supply status, capacity, load capacity, method to improve traction power supply system.

К числу приоритетных задач холдинга «Российские железные дороги» относится полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, снижение рисков при кризисных ситуациях в энергообеспечении железнодорожного транспорта [1]. Эта задача приобретает особую актуальность в условиях, когда оптимизация перевозочного процесса на сети решается в том числе за счет роста массы грузовых поездов, а также в условиях развития скоростного и высокоскоростного движения. При этом разработчики энергетической стратегии прямо отмечают риск, связанный с отсутствием необходимых резервов мощности системы электроснабжения, ограничением в потреблении электроэнергии и, как следствие, со снижением пропускной и провозной способности [1].

Гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса — это основная задача хозяйства электрификации и электроснабжения. Исходными условиями для оценки энергообеспеченности являются мощность системы тягового электроснабжения (СТЭ) и мощность, расходуемая электроподвижным составом (ЭПС). Решение задачи энергообеспечения перевозочного процесса возможно за счет разработки концепции развития тяжеловесного движения, оценки пропускной способности выделенных направлений по условиям электроснабжения, усиления элементов инфраструктуры для обеспечения пропуска тяжеловесных поездов на выделенных направлениях.

Критерий энергообеспеченности тяги поездов сформулирован как условие мажорируемости мощности СТЭ по отношению к мощности, расходуемой ЭПС, для выполнения поездной работы с заданной скоростью и заданной расстановкой поездов по участку [2]:

$$S_{\text{СТЭ}}, t, s \geq \max S_{\text{ЭПС}}, t, s F \\ (A_q, A_h, V_q, V_h, J_q, J_h, T_{\text{oo}});$$

$$\forall t \in [0 \div T];$$

$$\forall s \in [0 \div S],$$

где $S_{\text{СТЭ},t,s}$, $S_{\text{ЭПС},t,s}$ — соответственно множество значений привносимой СТЭ и потребляемой ЭПС мощности электротяжести в дискретные моменты времени t за период пребывания от 0 до T в дискретных координатах s при перемещении от координаты 0 до S ;

A_q , A_n , V_q , V_n , J_q , J_n , $T_{\text{оо}}$ — множество значений параметров четного и нечетного направлений соответственно по объему поездной работы A , т·км бр; технической скорости V , км/ч; межпоездному интервалу попутного следования J , мин; времени захода (отправления) поездов $T_{\text{оо}}$, ч.

В ряде случаев, например для сопоставительного анализа участков, ограничивающих пропускную способность, поиска наиболее узких мест, лимитирующих пропуск поездов, целесообразно использовать коэффициент запаса энергообеспеченности K_1 . Он показывает отношение имеющейся минимальной мощности СТЭ с учетом стороннего (нежелезнодорожного) и нетягового потребления к максимальной потребной мощности. По сути, этот коэффициент представляет собой кратность запаса энергообеспеченности СТЭ.

В отдельных случаях, например для оценки эффективности мероприятий по усилению СТЭ и, как следствие, повышению энергообеспеченности участков, целесообразно использовать показатель K_2 , обратный коэффициенту запаса энергообеспеченности. Он является более информативным, поскольку его значение до 1 указывает на штатную ситуацию, когда СТЭ обеспечивает требуемые размеры движения и при этом имеется запас мощности, а значение выше 1 указывает на неготовность СТЭ обеспечить требуемые размеры движения.

$$K_1 = \frac{S_{\text{СТЭ},t,s}}{S_{\text{ЭПС},t,s}},$$

$$K_2 = \frac{S_{\text{ЭПС},t,s}}{S_{\text{СТЭ},t,s}},$$

$$\forall t \in [0 \div T];$$

$$\forall s \in [0 \div S].$$

Понятие «энергообеспеченность» неразрывно связано с пропускной способностью, поскольку определяется готовностью элементов СТЭ обеспечить пропуск поездов по участку и может быть раскрыто через коэффициент использования нагрузочной способности устройств тягового электроснабжения [3]:

$$K_{\text{инс}} = \frac{\sum S_{\text{ЭПС}}}{S_{\text{СТЭ}}}, K_{\text{инс}} \leq 1.$$

Аналитические выражения для проверки энергообеспеченности по элементам нагрузочной способности приведены в табл. 1.

В табл. 1 используются следующие обозначения: I_{dt} — наибольшее среднее значение тока подстанции за период t , А; $\Sigma I_{B,\text{ном}}$ — суммарный номинальный ток включенных выпрямителей, А; k_{dB} — коэффициент допустимой нагрузки выпрямителя; U_{dnp} — приведенное номинальное напряжение, при 6-пульсовых схемах выпрямителей $U_{dnp} = 3,7$ кВ, при 12-пульсовых схемах $U_{dnp} = 3,6$ кВ; $\Sigma S_{T,\text{ном}}$ — суммарная номинальная мощность включенных преобразовательных трансформаторов, кВ·А; k_{dT} — коэффициент допустимой нагрузки преобразовательного трансформатора; $\Sigma S_{P,\text{ном}}$ — суммарная номинальная мощность понижающих трансформаторов, питающих преобразовательные агрегаты, кВ·А; S_p — мощность районной и нетяговой нагрузки, получающей питание от этих трансформаторов, кВ·А; k_{dPi} — коэффициент допустимой нагрузки понижающего трансформатора; $\Sigma S_{PT,\text{ном}}$ — суммарная номинальная мощность понижающих трансформаторов, находящихся в работе.

Таблица 1

Аналитические выражения для проверки энергообеспеченности по элементам нагрузочной способности

Элементы нагрузочной способности				Аналитическое выражение для проверки	
Силовое оборудование тяговых подстанций	Система постоянного тока	Выпрямители		$I_{dt} \leq (\sum I_{B,\text{ном}} k_{dB})$	
		Преобразовательные трансформаторы		$U_{dnp} I_{dt} \leq (\sum S_{T,\text{ном}} k_{dT})$	
		Понижающие трансформаторы		$(U_{dnp} I_{dt} + S_p) \leq (\sum S_{P,\text{ном}} k_{dPi})$	
	Система переменного тока	Трехфазные понижающие трансформаторы		$(3 \cdot 27,5 I_{\Phi\text{нб}} + S_p) \leq (\sum S_{PT,\text{ном}} k_{dPi})$	
		Однофазные понижающие трансформаторы		$(2 \cdot 27,5 I_{OT}) \leq (\sum S_{OT,\text{ном}} k_{dPi})$	
		Автотрансформаторы		$(2 \cdot 27,5 I_{A_i}) \leq (S_{AT,\text{ном}} k_{dPi})$	
		Обмотки и масло трансформатора		$1 \geq \left(\frac{\tau_{\text{обм. max}} - \tau_B - 18}{\tau_{\text{ннт. доп}} - \tau_B - 18} \right)^{0,56}$	
				$1 \geq \left(\frac{\tau_{\text{м. max}} - \tau_B - 17}{\tau_{\text{м. доп}} - \tau_B - 17} \right)^{0,53}$	
Контактная сеть по уровню напряжения на токоприемниках ЭПС				$K_{\text{инс}, U3} = (U_{xx,k} - U_{m3}) \leq (U_{xx,k} - U_{d,\text{min}})$	
Контактная сеть по нагреву проводов				$1 \geq \left(\frac{\tau_{\text{п.т}} - \tau_{\text{вк}}}{\tau_{dt} - \tau_{\text{вк}}} \right)^{0,43}$	

те, кВ·А; $I_{\text{фнб}}$ — наибольшее значение тока любой фазной обмотки на стороне 27,5 кВ за период t , А; $\Sigma S_{\text{OT,ном}}$ — суммарная номинальная мощность трансформаторов, включенных в данное плечо подстанции, кВ·А; I_{OT} — наибольшее значение тока любой секции расщепленной обмотки 27,5 кВ за период t , А; $S_{\text{AT,ном}}$ — номинальная мощность автотрансформатора, кВ·А; I_A — наибольшее значение тока обмотки (в выводе A или X) за период t , А; τ_b — расчетная температура окружающего воздуха, $\tau_b = 35^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{ннт,доп}}$ — допустимая температура обмотки, $\tau_{\text{ннт,доп}} = 140^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{м,доп}}$ — допустимая температура масла, $\tau_{\text{м,доп}} = 95^\circ\text{C}$; $U_{\text{хх,к}}$ — напряжение холостого хода в контактной сети, В, определяется как среднее значение напряжений холостого хода подстанций, питающих данную зону; U_{m3} — наименьшее среднее 3-минутное напряжение на токоприемнике ЭПС любого поезда, находящегося на данном пути межподстанционной зоны, В; $U_{d,\min}$ — минимальное допустимое напряжение в контактной сети, при постоянном токе $U_{d,\min} = 2700$ В, при переменном $U_{d,\min} = 21000$ В; τ_n — наибольшая средняя температура лимитирующего провода контактной сети вблизи точек подключения перегонных фидеров подстанций при длительности t протекания тока 1, 3 и 20 мин, $^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{вк}}$ — температура окружающего воздуха при расчетах нагревания проводов контактной сети, $\tau_{\text{вк}} = 40^\circ\text{C}$; τ_d — допустимая температура нагрева провода при соответствующей длительности t по нормам ЦЭ-868, $^\circ\text{C}$.

Важно отметить, что отличительной особенностью «Инструкции по расчету наличной пропускной способности» 2010 г. [3] является оценка энергообеспеченности по результатам моделирования различных вариантов с последующим поиском минимально возможного интервала движения (рис. 1).

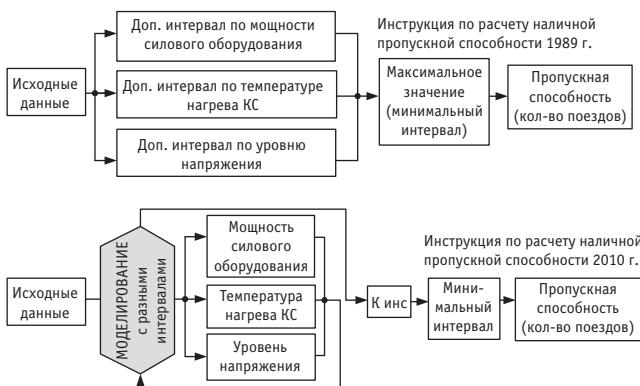


Рис. 1. Подход к расчету пропускной способности в 1989 и 2010 гг.

После оценки энергообеспеченности перевозочного процесса в случае выявления узких мест, лимитирующих пропуск поездов, следует этап разработки мероприятий по усилению СТЭ. Описание возможных способов усиления системы тягового электроснабжения, а также пути повышения точности расчета энергообеспеченности приведены в [4–6]. В данной работе рассматривается разработанный авторами алгоритм выбора мероприятий по усилению СТЭ постоянного (рис. 2) и переменного (рис. 3) тока. Алгоритм включает три этапа.

На первом этапе производится оценка минимального уровня напряжения в контактной сети и определение направления

усиления: активные средства усиления (в случае существенного падения уровня напряжения), пассивные средства (в случае несущественного падения уровня напряжения), регулирование напряжения холостого хода (в случае незначительного падения уровня напряжения).

На втором этапе определяются элементы нагрузочной способности, лимитирующие пропускную способность, и способ усиления системы тягового электроснабжения.

Вариант первый. Показателями нагрузочной способности, лимитирующими пропускную способность, являются уровень напряжения или токовые нагрузки в контактной сети. В этом случае производится сравнение токовых нагрузок контактной сети смежных путей. Если токовые нагрузки смежных путей существенно различаются, значит, необходимо установить дополнительное попечное соединение в контактной сети смежных путей (ППС). Если токовые нагрузки смежных путей различаются несущественно, необходимо усиление контактной сети.

Вариант второй. Показателем нагрузочной способности, лимитирующим пропускную способность, является силовое оборудование тяговых подстанций. В этом случае производится оценка коэффициента использования пропускной способности. Если его значения составляют от 1 до 2, требуется установить более мощное силовое оборудование. Если коэффициент использования пропускной способности более 2, значит, необходимы активные мероприятия (установка дополнительных тяговых подстанций — стационарных или передвижных), установка ППН (для постоянного тока). После их проведения следует выполнить корректировку напряжения холостого хода тяговых подстанций вследствие изменения внутренних сопротивлений тяговых подстанций и перераспределения токовых нагрузок.

На третьем этапе проводится проверка выполнения условий защиты от токов короткого замыкания и проверка элементов обратной тяговой цепи. Если условия защиты от токов короткого замыкания не выполняются, необходима реализация мероприятий по обеспечению условий защиты. В случае если элементы обратной тяговой сети не соответствуют токовым нагрузкам, необходимо их усиление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные варианты оценки энергообеспеченности перевозочного процесса можно использовать в условиях повышения массы поездов на участках постоянного и переменного тока, когда происходит существенное увеличение токовых нагрузок, а также в условиях введения скоростного и высокоскоростного движения, когда показатели нагрузочной способности приобретают особую значимость. Кроме того, рассмотренные варианты расчета можно применять в качестве экспресс-оценки энергообеспеченности участка по показателям нагрузочной способности с учетом инструкции по расчету наличной пропускной способности (2010 г.) [3]. При выявлении узких мест, лимитирующих пропуск поездов, можно использовать предложенные алгоритмы выбора мероприятий по усилению системы тягового электроснабжения по постоянному и переменному току. Алгоритм позволяет определить варианты, обеспечивающие максимальный эффект по приведению показателей нагрузочной способности к нормативным значениям.

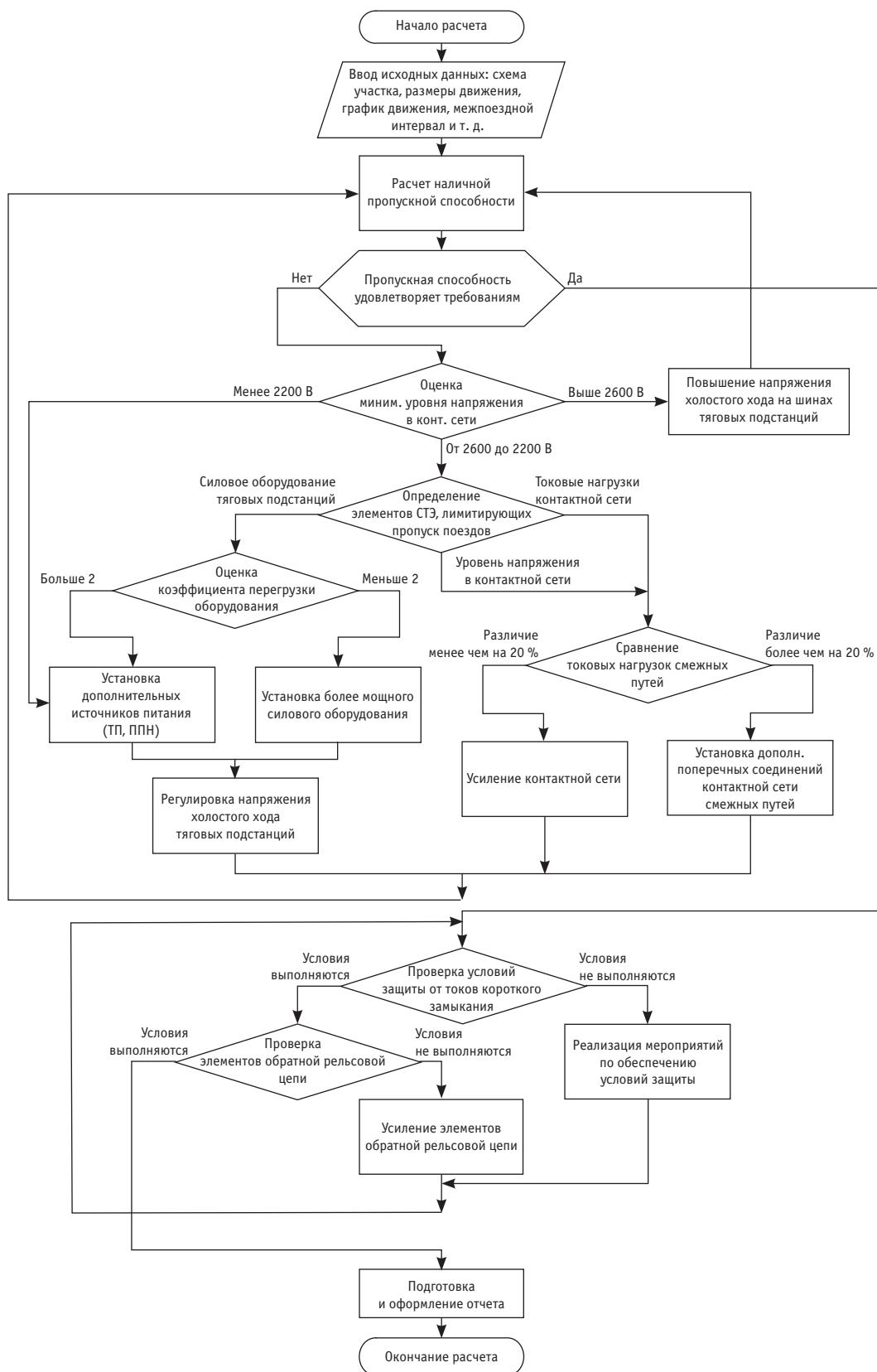


Рис. 2. Алгоритм усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока

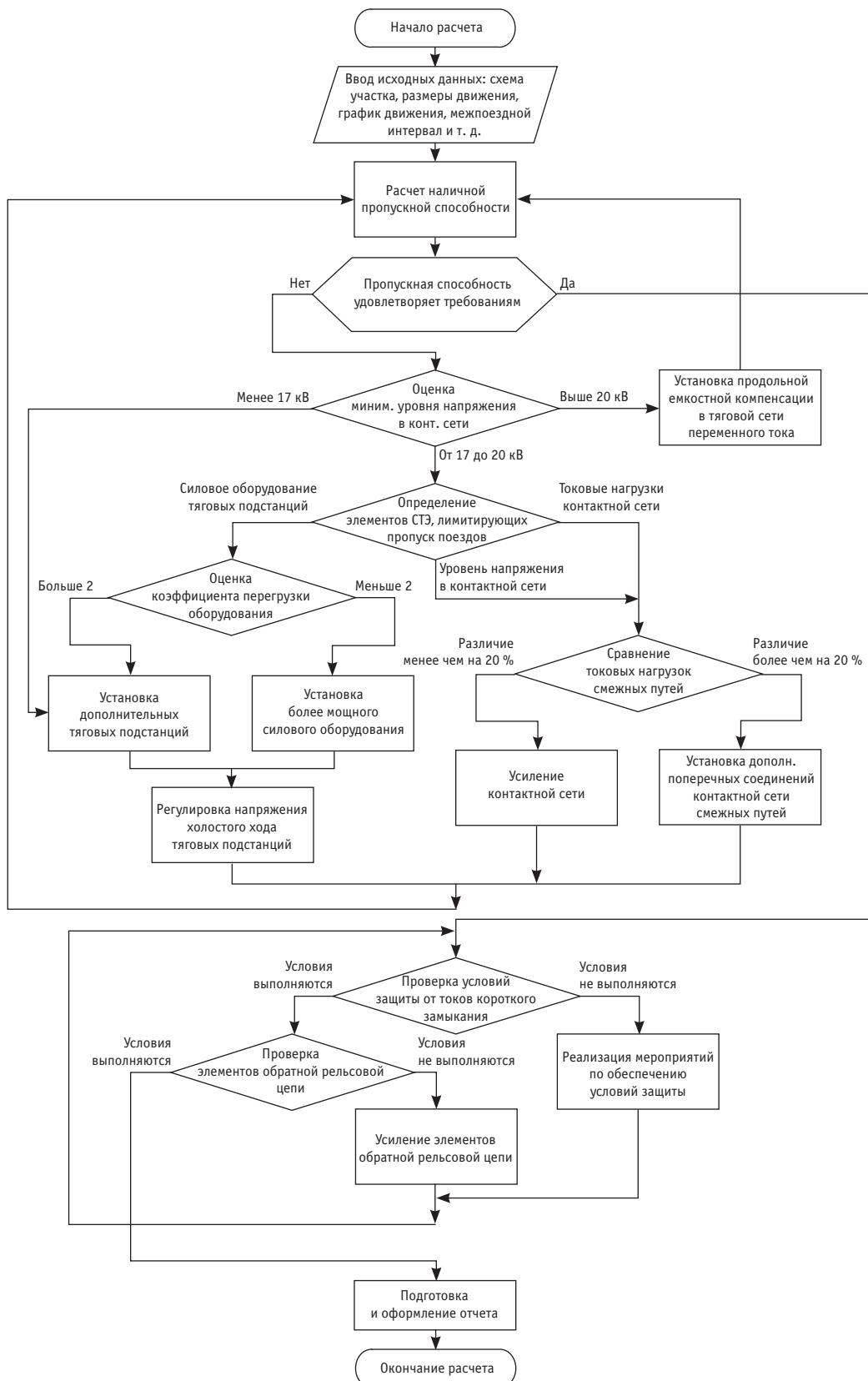


Рис. 3. Алгоритм усиления системы тягового электроснабжения переменного тока

Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года / утв. распоряжением ОАО «РЖД» 15.12.11 № 2718р.
2. Митрофанов А. Н., Гаранин М. А., Добринин Е. В. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения : учеб. пособие для студ. вузов ж.-д. трансп. Самара, 2009.
3. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог / ОАО «РЖД». М., 2010.
4. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Использование данных о токовых нагрузках фидеров контактной сети для проверки адекватности модели системы тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. 2013. № 2 (50). С. 7–11. ISSN 0201-727X.
5. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Повышение точности расчета энергообеспеченности перевозочного процесса // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 6 (36). ISSN 1997-0722.
6. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Выбор мероприятия по усилению системы тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту : матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. / СамГУПС. Самара, 2013.

References

1. Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda [Energy strategy of Russian Railways Holding for the period up to 2015 and the prospect of up to 2030] / utv. rasporyazheniem OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» 15.12.11 № 2718r.
2. Mitrofanov A. N., Garanin M. A., Dobrynin Ye. V. Upravlenie tekhnologiyami elektropotrebleniya i energosberezheniya : ucheb. posobie dlya stud. vuzov zh.-d. transp. [Management of energy consumption and energy saving technologies : a textbook for railway universities]. Samara, 2009.
3. Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Instructions for calculating the actual capacity of railways] / OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi». M., 2010.
4. Garanin M. A., Blinkova S. A. Ispolzovanie dannykh o tokovykh nagruzkakh fidarov kontaktnoy seti dlya proverki adekvatnosti modeli sistemy tyagovogo elektronsnabzheniya [Using data on current loads of catenary feeders to test the adequacy of traction power system model] // Vestnik RGUPS. 2013. № 2 (50). S. 7–11. ISSN 0201-727X.
5. Garanin M. A., Blinkova S. A. Povyshenie tochnosti rascheta energoobespechennosti perevozochnogo protsessa [Improving the accuracy of estimate of power supply status of the transportation process] // Vestnik transporta Povolzhya. 2012. № 6 (36). ISSN 1997-0722.
6. Garanin M. A., Blinkova S. A. Vybor meropriyatya po usileniyu sistemy tyagovo-go elektronsnabzheniya [Selecting measures to improve traction power system] // Nauka i obrazovanie transportu : mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / SamGUPS. Samara, 2013.

УДК 629.114

Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Владимир Леонидович Новоселов, старший преподаватель кафедры «Технологии транспортного производства» Челябинского института путей сообщения (ЧИПС)

КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ С ЭЛЕКТРОПНЕВМОПРИВОДОМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАТЕГОРИЙ 0₂, 0₃, 0₄

Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Automobiles, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Vladimir Leonidovich Novoselov, Senior Lecturer, Department of Vehicle Manufacturing Technologies, Chelyabinsk Institute of Railway Transport (CHIRT)

Equipment for testing electropneumatic brake systems for 0₂, 0₃, 0₄ category vehicles

Аннотация

Статья посвящена современному комплексу оборудования для испытаний тормозных систем прицепов и полуприцепов. Показана функциональная схема комплекса оборудования. Перечислены его функциональные элементы, их назначение и описание. Приведены регистрируемые параметры электропневматических тормозов. Показаны проект имитатора тягача, устройство модулятора давления, оборудование для поверки всего комплекса. Разработано руководство по испытанию полуприцепов с электропневматическим приводом тормозов.

Ключевые слова: тормозная система, прицеп, полуприцеп, АБС, испытания.

Summary

The article is devoted to the modern complex of equipment for testing brake systems of trailers and semitrailers. The functional diagram of the set of equipment is shown. Its functional elements, their purpose and description are provided. Recorded parameters of electropneumatic brakes are specified. Tow car simulator project, pressure modulator device, equipment for checking the entire complex are shown. A guide is developed for testing semitrailers with electropneumatic brakes.

Keywords: brake system, trailer, semitrailer, ABS, test.

Одним из перспективных методов повышения эффективности и устойчивости автопоезда при торможении является проведение качественного технического диагностирования тормозных систем. Оно заключается в повышении безопасности проведения испытаний, уменьшении затрат времени и средств на проведение контрольных проверок, повышении точности измерений, получении полной информации о тормозных свойствах автопоезда. Современное развитие тормозных систем связано с применением электронных систем безопасности последнего поколения, которые обеспечивают безопасность движения с помощью антизаноса, антипрокидывания, предупреждения о наличии препятствий. К примеру, система поперечной устойчивости контролирует угол наклона платформы с помощью датчиков, расположенных в колесах. Прокидывание замечается на ранней стадии, после чего начинается автоматическое торможение. Это важно для полуприцепов с высоким центром тяжести, таких как панелевозы и самосвалы. Новые системы позволяют сохранять устойчивость при нецентральном положении груза, с помощью блокировочного устройства защищают полуприцеп от угона, осуществляют динамический контроль колесной базы полуприцепа и имеют другие полезные функции.

Известно много стендов для испытания тормозных систем транспортных средств, в частности рассмотренных в работах [1–3]. Но при применении перечисленных методов не оценивается работа АБС, электропневматического привода тормозов (далее — EBS) автопоезда и автоматической системы контроля тормозной силы в зависимости от степени загрузки (далее — LSV).

Использование широко распространенных при испытаниях тракторов и автомобилях светолучевых осциллографов не приемлемо, так как данные о ходе испытаний нужно получать практически мгновенно. От этого зависит прежде всего безопасность испытателя, время и количество испытаний, а также время обработки информации. Данная статья посвящена

современному комплексу оборудования для испытаний автобусов, так как в процессе испытаний необходимо регистрировать несколько быстроменяющихся параметров.

Для регистрации измеряемых в ходе испытаний физических величин, математической обработки полученных результатов и управления на предварительном этапе рабочей тормозной системой полуприцепа используется комплекс оборудования, функциональная схема которого показана на рис. 1.

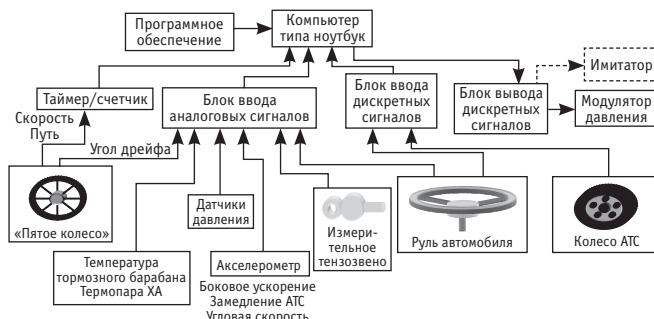


Рис. 1. Функциональная схема комплекса оборудования

Используются следующие функциональные элементы комплекса:

портативный компьютер типа ноутбук (Pentium 4-2800/256/40 DVD-CDRW);

устройство связи компьютера с системой датчиков, устройством формирования режимов торможения полуприцепа, системой электропитания;

система электрических датчиков;

устройство формирования режимов торможения полуприцепа.

Компьютер служит для сбора, обработки и запоминания первичной информации с датчиков, упорядочивания информации в функции текущего времени, формирования команд управления полуприцепом, визуального оперативного контроля над ходом эксперимента, архивирования и документирования результатов испытаний. Программное обеспечение позволяет автоматизировать все вышеперечисленные этапы проведения эксперимента.

Устройство связи предназначено для усиления и согласования аналоговых сигналов с датчиков с цифровым обрабатывающим устройством, усиления и передачи команд управления, электрического питания системы. Содержит следующие смесные блоки: стабилизированный источник питания, аналого-цифровой преобразователь, дифференциальный усилитель, цифровой коммутатор, электронные ключи.

Система датчиков в соответствии с таблицей измеряемых параметров (табл. 1) включает:

два датчика давления пьезорезистивного типа MPX5700D;

путьизмерительное колесо (рис. 2) (диаметр 600 мм, дискретность измерения углового перемещения 1/18 об.) с первичным преобразователем типа ДХК-7АК (преобразователь Холла);

тактовый генератор компьютера в качестве таймера.

Устройство формирования режимов торможения полуприцепа представляет собой электропневматический преобразо-

ватель (рис. 3), формирующий по команде компьютера необходимую величину давления в исполнительных органах тормозной системы.

Таблица 1

*Регистрируемые параметры
электропневматических тормозов*

Регистрируемый параметр	Диапазон измерений	Погрешность измерения (не более)
Пневматическое давление, МПа (три измерительных канала)	0,05–1,00	±3,0 %
Пройденный путь, м	5–6000	±1,0 %
Скорость движения, км/ч	0–80	±1,0 %
Установившееся замедление, м/с ²	0,5–10	±3,0 %
Угловая скорость вращения колес, рад/с	2–44	±1,0 %
Усилие в сцепном устройстве, кН (т)	8–80 (0,8–8)	±3,0 %
Временные характеристики пневмопривода, с (время срабатывания, время запаздывания)	0,1–1	±0,01с
Усилие на органе управления — педали тормоза, кгс	0–70	±3,0 %
аварийный тормоз	0–60	±3,0 %
с ручным управлением	0–70	±3,0 %
аварийный тормоз	0–60	±3,0 %
с ножным управлением	0–70	±3,0 %
стояночный тормоз	0–60	±3,0 %
с ручным управлением	0–70	±3,0 %
стояночный тормоз	0–70	±3,0 %
с ножным управлением	0–70	±3,0 %
Температура тормозного барабана, °C	0–100	±1,0

Примечания. 1. В процентах выражается относительная погрешность, а в единицах измеряемой величины — абсолютная погрешность средств измерения. 2. Выделенные в таблице параметры являются общими для всех видов тормозов.

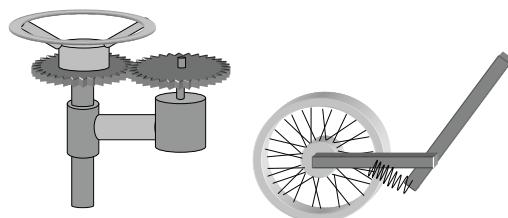


Рис. 2. «Пятое колесо» для измерения скорости АТС и угла дрейфа автомобиля



Рис. 3. Преобразователь фирмы Analog Devices

Для замера временных характеристик тормозных систем прицепов предназначен имитатор, общая схема которого показана на рис. 4.

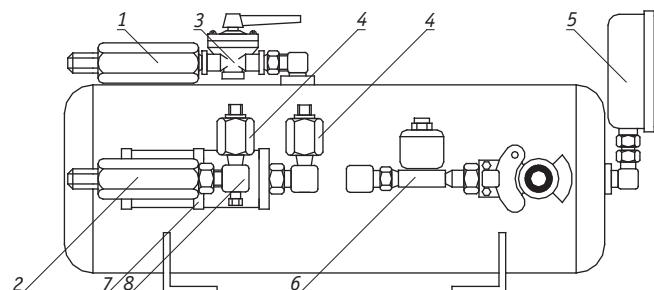


Рис. 4. Общая схема имитатора тягача:

- 1 — магистраль питания; 2 — магистраль управления;
3 — тормозной кран; 4 — датчики; 5 — манометр; 6 — электроклапан 1;
7 — электроклапан 2; 8 — регулируемый дроссель

Имитатор включает:

воздушный ресивер емкостью 30 л;
патрубки;
образцовый манометр (диапазон измерений 0–1,0 МПа);
две сцепные головки (для подключения к воздушной магистрали тягача);
два электромагнитных клапана (П-РЭ-3/2,5-1112 ТУ2-053-1612-82);
два датчика давления (диапазон 0–1,0 МПа).

Для прогрева тормозов прицепов предназначен «модулятор давления», с помощью которого производится подтормаживание полуприцепа (усилие на сцепке должно быть равно 7 % от максимальной статической нагрузки на ось).

Модулятор давления состоит из двух электромагнитных пневматических клапанов и датчика давления.

Оборудование для поверки всего комплекса:
динамометры растяжения ДПУ-50-2 на пределы измерения 0–50 и 0–100 кН;
измеритель параметров реле цифровой Ф291 (или секундомер).

Вспомогательное оборудование:
компрессор с максимальным рабочим давлением 1,0 МПа;
стенд для силового нагружения измерительной тензопетли.
При испытаниях полуприцепов с системой EBS (рис. 5) определяются следующие параметры:
время реакции;
энергопотребление системой АБС с помощью равнозначных запусков;
замер тормозного усилия на все оси с помощью роликового динамометра;
характеристика LSV при неподвижном полуприцепе.



Рис. 5. Техническое диагностирование тормозной системы

Разработанное руководство по испытанию прицепов и полуприцепов с системой EBS приведено в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Руководство по испытанию прицепов и полуприцепов с системой EBS

Испытание	Регламентирующий документ	Регистрируемые параметры	Порядок проведения испытаний	Имитация
Время реакции	98/12/ЕС, приложение III ECE R 13, приложение 6	Время нарастания <0,44 с. Требования к времени ответа не предъявляются	С помощью СТУ Подготовка: — установить LSV в режим «с грузом» — при необходимости сузить тормозной диапазон	A
Энергопотребление системой АБС с помощью равнозначных запусков	98/12/ЕС, приложение XIV	После серии равнозначных запусков (n_e) по сертификату АБС давление в цилиндре после последнего запуска не должно упасть ниже 22,5 %. TEBS-D: дисковый тормоз: $n_e = 11$ барабанный тормоз: $n_e = 10$ VCS 1: дисковый тормоз: $n_e = 16$ барабанный тормоз: $n_e = 16$	Заполнить резервуар полуприцепа до 8 бар Отключить подачу воздуха При давлении желтой соединительной головки в 6,5 бар затормозить n_e раз Сравнить с требуемым давлением	A
Замер тормозного усилия на все оси с помощью роликового динамометра		Измеряются значения управляемого тормозного усилия при незагруженном полуприцепе	На время испытания подъемный мост следует опустить	B

Окончание табл. 2

Испытание	Регламентирующий документ	Регистрируемые параметры	Порядок проведения испытаний	Имитация
Характеристика LSV при неподвижном полуприцепе		С помощью измерительного прибора определяется выводимая системой EBS характеристика для незагруженного и загруженного полуприцепа	Подсоединить клапан точного управления давлением и прибор измерения давления к желтой соединительной головке Подсоединить прибор измерения давления к испытательному разъему тормозного цилиндра Подать ток к системам полуприцепа Медленно повысить давление с помощью клапана точного управления давлением и зафиксировать показания прибора	C

Таблица 3

Проведение имитаций при испытании прицепов и полуприцепов с системой EBS

Имитация	Порядок имитации	Поколение C	Поколение D	Примечания
A	Загрузить полуприцеп	Отсоединить штепсель датчика нагрузки на ось Подсоединить испытательный клапан к соединению 5 и проимитировать давление загруженных пневматических опор В настройках установить тормозное давление в режиме «без груза» на 6,5 бар (после замеров необходим перезапуск)	Опустить давление в пневматических опорах ниже 0,15 бар следующим образом: – с помощью поворотного клапана сдвинуть опоры – подсоединить испытательный клапан к соединению 5 и проимитировать давление загруженных пневматических опор – в настройках установить тормозное давление в режиме «без груза» на 6,5 бар (после замеров необходим перезапуск)	После испытания подсоединить штепсель датчика нагрузки на ось
B	Опустить поднятый подъемный мост незагруженного полуприцепа	Установить давление в пневматической подвеске между 0,15 и 0,25 бар следующим образом: – с помощью поворотного клапана сдвинуть опоры – подсоединить имитационное давление к разъему модулятора для датчика давления в пневматических опорах Либо воспользоваться компьютерной диагностикой	Установить давление в пневматической подвеске между 0,15 и 0,25 бар следующим образом: – с помощью поворотного клапана сдвинуть опоры – подсоединить имитационное давление к разъему 5 модулятора Либо воспользоваться компьютерной диагностикой	
C	Режим для испытания характеристики LSV. Отключаются функции аварийного торможения и длительного простоя	Включить зажигание/подать питание при неподвижном состоянии полуприцепа и отсутствии давления на желтой соединительной головке	Включить зажигание/подать питание при неподвижном состоянии полуприцепа и отсутствии давления на желтой соединительной головке	Испытательный режим отключается при скорости выше 2,5 км/ч

Литература

- Федотов А. И., Осипов А. Г. Стенд для диагностирования автотранспортных средств // Автомобильная промышленность. 2007. № 5. С. 24–26. ISSN 0005-2337.
- Программно-аппаратный комплекс для натурных исследований аэродинамики автопоездов / М. С. Высоцкий, Б. Б. Виленчик, М. И. Горбацевич и др. // Автомобильная промышленность. 2002. № 6. С. 30–32. ISSN 0005-2337.
- Загородных А. Н., Севрюгина Н. С., Загородных Н. А. Стенд для исследования тормозного пути автотранспортных средств // Автомобильная промышленность. 2006. № 8. С. 30–31. ISSN 0005-2337.

References

- Fedotov A. I., Osipov A. G. Stend dlya diagnostirovaniya avtotsentrnykh sredstv [Vehicle diagnosis bench] // Avtomobilnaya promyshlennost. 2007. № 5. S. 24–26. ISSN 0005-2337.
- Programmno-apparatny kompleks dlya naturnykh issledovanii aerodinamiki avtopoezdov [Hardware and software system for in situ research trains aerodynamics] / M. S. Vysotsky, B. B. Vilenchits, M. I. Gorbatsevich i dr. // Avtomobilnaya promyshlennost. 2002. № 6. S. 30–32. ISSN 0005-2337.
- Zagorodnikh A. N., Sevryugina N. S., Zagorodnikh N. A. Stend dlya issledovaniya tormoznogo puti avtotsentrnykh sredstv [Bench for research of braking distance of vehicles] // Avtomobilnaya promyshlennost. 2006. № 8. S. 30–31. ISSN 0005-2337.

УДК 629.332

Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Владимир Леонидович Новоселов, старший преподаватель кафедры «Технологии транспортного производства» Челябинского института путей сообщения (ЧИПС), Челябинск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПОДВЕСКЕ ПОЛУПРИЦЕПА

Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Automobiles, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Vladimir Leonidovich Novoselov, Senior Lecturer, Department of Vehicle Manufacturing Technologies, Chelyabinsk Institute of Railway Transport (CHIRT)

Mathematical modeling of dynamic process in semitrailer suspension

Аннотация

В статье поставлена задача определения динамической нагруженности подвески полуприцепа. Представлена математическая модель колебательного процесса в подвеске полуприцепа, которая позволяет определить перемещения и скорости подпрессоренной и неподпрессоренной масс в зависимости от времени, дополнительную динамическую составляющую в упругом элементе подвески, суммарное усилие в подвеске (динамическое плюс статическое), усилие в амортизаторе и другие параметры. Показан порядок расчета усилий в элементах подвески — рычаге, рессоре, шаровых шарнирах, резинометаллической втулке и др.

Ключевые слова: полуприцеп, подвеска, амортизатор, рессора, плавность хода.

Summary

The article poses the problem of determining the dynamic loading of suspension of semitrailer. A mathematical model of the oscillatory process in the semitrailer suspension is provided, which allows to determine displacement and velocity of the sprung and unsprung weights with time, additional dynamic component in elastic suspension element, total force in the suspension (dynamic plus static), force in the damper, and other parameters. The procedure for calculating the forces in suspension elements — arm, spring, ball joints, rubber-bush etc is provided.

Keywords: semitrailer, suspension, shock absorber, spring, smoothness of movement.

Структурная схема подвески полуприцепа представлена на рис. 1. Подвеска является двухрычажной независимой с рычагами разной длины.

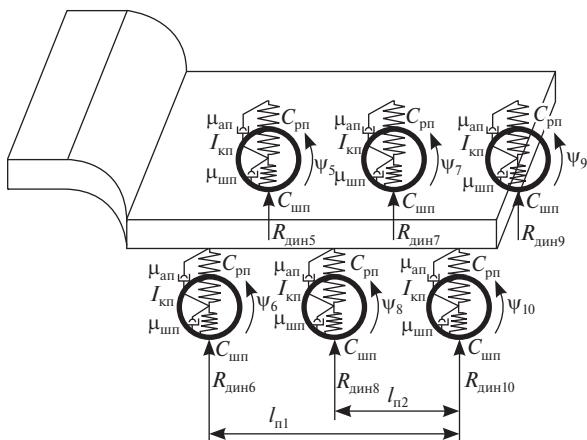


Рис. 1. Структурная схема подвески полуприцепа

Рассчитывать плавность хода полуприцепа, определять динамическую нагруженность подвески при наездах на единичное препятствие, заданное периодической функцией, будем для рессорного моста с амортизатором, схема которого представлена на рис. 2.

Для существующих полуприцепов коэффициент распределения подпрессоренной массы (ε_y) принимает значения, позволяющие рассматривать колебания подпрессоренных масс, приходящихся на первую, вторую и третью ось полуприцепа, независимо друг

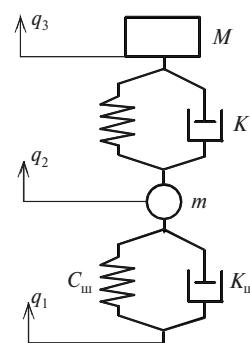


Рис. 2. Рессорный мост с амортизатором

от друга. Обозначения: q_3 — перемещение подпрессоренной массы передней оси; q_2 — перемещение неподпрессоренной массы передней оси; q_1 — неровность дорожного покрытия под передними колесами; M, m — подпрессоренная и неподпрессоренная массы одной подвески передней оси; C, K — жесткость и коэффициент демпфирования передней оси; $C_{ш}, K_{ш}$ — жесткость и коэффициент демпфирования одной шины передней оси.

Для одной подвески передней оси полуприцепа параметры динамической системы составляют: $M = 295$ кг, $m = 29$ кг.

Жесткость одной подвески передней оси 21 кг/см, что соответствует $C = 21000$ Н/м.

Жесткость одной шины передней оси составляет 155 кг/см, что соответствует $C_{ш} = 155000$ Н/м.

$$\frac{M \cdot g}{C} = 0,138 \frac{m}{s^2};$$

$$\frac{(M+m) \cdot g}{CH} = 0,02 \frac{m}{s^2}.$$

Коэффициенты демпфирования амортизаторов принимаем исходя из того, что при проезде единичной неровности подпрессоренная масса должна совершить 1,5–2 колебания, т.е. $K = 200$. Коэффициент демпфирования шин $K_{ш} = 50$.

В данной работе поставлена задача определения динамической нагруженности подвески полуприцепа при переезде единичной неровности высотой $q_0 = 0,1$ м и протяженностью 0,7 м (профиль неровности задан периодической функцией).

В исследованиях за профиль единичной неровности принимают полуволну синусоиды:

$$q_1 = q_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

где ω — циклическая частота, рад/с.

В данной работе профиль неровности будем задавать функцией

$$q_1 = (q_0 / 2)(1 - \cos \omega t), \quad (2)$$

где q_0 — амплитуда неровности.

Скорость проезда неровности составляет 60 км/ч (16,67 м/с). Неровность протяженностью 0,7 м полуприцеп преодолеет за время $0,7 / 16,67 = 0,042$ с (период). При анализе решений системы дифференциальных уравнений рассматриваем только промежуток времени 0–0,042 с. Частота воздействия неровностей v составит $1 / 0,042 = 23,81$ Гц. Циклическая частота колебаний

$$\omega = 2\pi v \quad (3)$$

составит $\omega = 2\pi \cdot 23,81 = 149,52$ рад/с.

Таким образом, неровность задаем выражением (2), причем $t \in [0; 0,042]$ с. При $t > 0,042$ с следует ровный участок дороги $q_1 = 0$.

Зависимость высоты неровности q_1 от времени t ее проезда представлена на рис. 3.

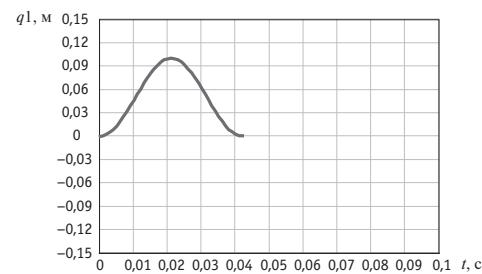


Рис. 3. Зависимость высоты неровности от времени

Математическая модель [1–3] описания колебательного процесса в подвеске полуприцепа для рессорного моста с амортизатором (см. рис. 3) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} M d^2 q_3 / dt^2 + K(dq_3 / dt - dq_2 / dt) + C(q_3 - q_2) + \\ + K_{ш}(dq_2 / dt - dq_1 / dt) + C_{ш}(q_2 - q_1) = 0; \\ md^2 q_2 / dt^2 - K(dq_3 / dt - dq_2 / dt) - C(q_3 - q_2) + \\ + K_{ш}(dq_2 / dt - dq_1 / dt) + C_{ш}(q_2 - q_1) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$q_1 = (q_0 / 2)(1 - \cos \omega t), \quad t \in [0; 0,042 \text{ с}]; \quad q_1 = 0, \quad t \in [0,042 \text{ с}; \infty].$$

Тем самым математическая модель состоит из двух дифференциальных и одного алгебраического уравнения.

При составлении математической модели были приняты следующие допущения:

учитываются только вертикальные колебания;

жесткости и коэффициенты сопротивления подвесок и шин постоянны;

контакт колеса с дорогой точечный.

Используя также и другие константы, можем получить, например, комбинации:

$(x_0 - x_2)C$ — дополнительная динамическая составляющая в упругом элементе передней оси;

$(x_0 - x_2)C + Mg$ — суммарное усилие в передней подвеске (динамическое плюс статическое), где g — ускорение свободного падения;

$(x_1 - x_3)K$ — усилие в амортизаторе и т.д.

Перемещения подпрессоренной q_3 и неподпрессоренной q_2 масс в зависимости от времени представлены на рис. 4.

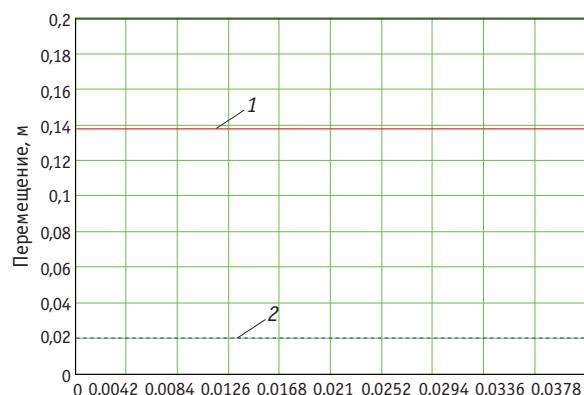


Рис. 4. Перемещения подпрессоренной (1) и неподпрессоренной (2) масс в зависимости от времени

На рис. 5 приведены скорости подпрессоренной dq_3/dt и неподпрессоренной dq_2/dt масс в зависимости от времени.

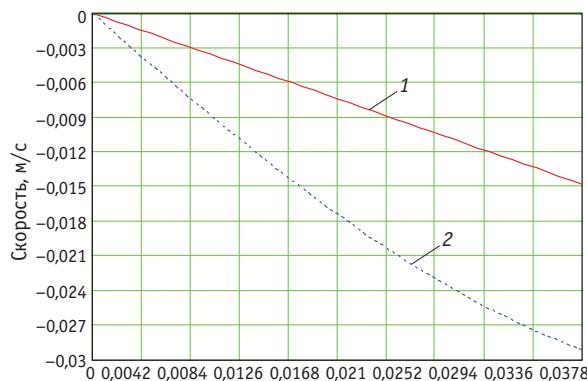


Рис. 5. Скорости подпрессоренной (1) и неподпрессоренной (2) масс в зависимости от времени

Наибольшее усилие со стороны упругого элемента и амортизатора на нижний рычаг подвески (рис. 6) возникает через 0,034 с после наезда на препятствие.



Рис. 6. Фотография упругого и демпфирующего элементов подвески

Максимальное значение силы составляет $F_{\text{прив}} = 5800$ Н. Данное усилие, согласно динамической модели, является приведенным к пятну контакта шины с дорожной поверхностью. Реальная сила F_2 , действующая со стороны подвески на рычаг, связана с силой $F_{\text{прив}}$ соотношением $F_2 L_2 = F_{\text{прив}} L_1$. Тем самым величина силы $F_2 = 8700$ Н. Из рассмотрения равновесия рычага (см. рис. 1) величина силы F_3 составит:

$$F_3 = F_2 \cdot L_2 / L_1, \quad (5)$$

$$F_3 = 8700 \cdot 0,18 \text{ м} / 0,27 \text{ м} = 5800 \text{ Н.}$$

Сила $F_1 = F_2 - F_3$ и составляет 2900 Н.

Наибольший изгибающий момент в нижнем рычаге подвески возникает в месте приложения силы F_2 (наиболее опасное сечение). В данном месте рычаг имеет корытный профиль с полкой 120 мм и двумя полками по 50 мм. Толщина металла 3 мм. Изгиб происходит вокруг полки 120 мм.

Изгибающий момент в наиболее опасном сечении:

$$M = F_3 (L_1 - L_2), \quad (6)$$

$$M = 5800 \text{ Н} \cdot (0,27 \text{ м} - 0,18 \text{ м}) = 520 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент сопротивления сечения составит $W = 0,000004 \text{ м}^3$. Напряжения при изгибе:

$$\sigma = M/W = 520/0,000004 = 130 \cdot 10^6 \text{ Па} = 130 \text{ МПа.} \quad (7)$$

Для низкоуглеродистых сталей, из которых штампуют рычаги, предел текучести при растяжении составляет 280 МПа. Коэффициент запаса составит 2,2. Пружину передней подвески необходимо считать с учетом угла наклона α [4].

На рис. 7 представлен общий вид рессоры полуприцепа.



Рис. 7. Полуэллиптическая рессора

Для расчетов представляет интерес значение горизонтальной силы, действующей на элементы подвески при проезде неровностей. Значение силы F_r , действующей в горизонтальном направлении, определяется коэффициентом касательной к поверхности, которую в данный момент проезжает колесо полуприцепа. К нашему случаю касательной к функции: $q_1 = (q_2/2) \times (1 - \cos \omega t)$.

Сила F_r связана с вертикальным усилием $F = C_{\text{ш}}(q_2 - q_1)$ в точке контакта шины с неровностью соотношением

$$F_r = (Fdq_1/dt)/v, \quad (8)$$

где v — скорость полуприцепа.

Сила F_r обращается в ноль там, где коэффициент касательной равен нулю. Это усилие необходимо учитывать при расчете шаровых шарниров. В момент времени $t = 0,15$ с имеет место пик силы F_r величиной 4000 Н. В данный момент времени сила $F_{\text{прив}}$ имеет значение 3750 Н, соответственно сила $F_2 = 5625$ Н. Тем самым $F_3 = 5625 \text{ Н} \cdot 0,18 \text{ м} / 0,27 \text{ м} = 3750 \text{ Н}$, $F_1 = 5625 - 3750 = 1875$ Н. Вертикальная реакция в одном шарнире составит $F_1/2 = 937,5$ Н. Силу F_r в шарнирах уравновешивают реакции F_p : $F_p \cdot b = F_r \cdot L_1$. $F_p = 4000 \text{ Н} \cdot 0,27 \text{ м} / 0,24 \text{ м} = 4500$ Н. Складывая реакции в шарнирах $F_1/2$ и F_p , получаем результирующую силу $F = 4600$ Н. Эту силу в шарнире воспринимает резинометаллическая втулка длиной $l = 0,04$ м, работающая по пальцу диаметром $d = 0,014$ м. Напряжения смятия составят:

$$\sigma_{\text{см}} = F/l d = 4600/0,04 \cdot 0,014 = 8 \text{ МПа.} \quad (9)$$

Допускаемое напряжение смятия для упругих резиновых муфт составляет 8–10 МПа. Подпятник (упорный элемент нижнего рычага) должен рассчитываться на усилие $F_n = F_r = 4000$ Н.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать динамический процесс в подвеске, производить оптимизацию по плавности хода и другим параметрам.

Литература

1. Новоселов В.Л. Повышение эффективности торможения трехосных полуприцепов за счет применения подвески с управляемыми амортизаторами // Матер. междунар. науч. симпозиума «Автотракторостроение-2009». М. : МГТУ «МАМИ», 2009 [Электронный ресурс]. URL: http://mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s01/s01_33.pdf (дата обращения: 08.07.2014).
2. Новоселов В.Л. Совершенствование параметров плавности хода пневматической подвески прицепов и полуприцепов // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : матер науч.-техн. конф., посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. Т. 2. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. Вып. 97 (180).
3. Новоселов В. Л. Улучшение плавности хода, устойчивости и управляемости большегрузной прицепной техники за счет рационального выбора конструктивных параметров подвески // Проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта и подготовки отраслевых кадров : матер. внутривуз. конф. / Под ред. В. Л. Федяева. Челябинск : ЧИПС, 2012. 171 с.
4. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. М. : Машиностроение, 2001. 920 с.

References

1. Novoselov V. L. Povyshenie effektivnosti tormozheniya trekhosnykh polupritseporov za schet primeneniya podveski s upravlyayemymi amortizatorami [Improving braking efficiency of three-axle semitrailers through the use of suspension with adjustable dampers] // Mater. mezhdunar. nauch. simpoziuma «Avtotraktorostroenie-2009». M. : MGTU «MAMI», 2009 [Electronic resource]. URL: http://mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s01/s01_33.pdf (date accessed: 08.07.2014).
2. Novoselov V. L. Sovremenstvovaniye parametrov plavnosti khoda pnevmaticheskoy podveski pritseporov i polupritseporov [Improving parameters of smoothness of movement of air suspension of trailers and semitrailers] // Transport XXI veka: issledovaniya, innovatsii, infrastruktura : mater/ nauch.-tekhn. konf., posv. 55-letiyu USURT : v 2 t. T. 2. Ekaterinburg : USURT, 2011. Vyp. 97 (180).
3. Novoselov V. L. Uluchshenie plavnosti khoda, ustoychivosti i upravlyayemosti bolshegruznoy pritseprnoy tekhniki za schet ratsionalnogo vybora konstruktivnykh parametrov podveski [Improving smoothness of movement, stability and control of heavy-duty trailed machinery through rational choice of suspension design parameters] // Problemy sovershenstvovaniya raboty zhelezodorozhzhogo transporta i podgotovki otrazhevym kadrav : mater. vnutrивуз. konf. / Pod red. V. L. Fedyaeva. Chelyabinsk : ChIPS, 2012. 171 s.
4. Anuryev V. I. Spravochnik konstruktora-mashinostroyatelya : v 3 t. [Reference book for mechanical engineers and designers : in three books]. M. : Mashinostroenie, 2001. 920 s.

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

№ 3 (42), 2014 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,
т. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,
e-mail: EPupova@usurt.ru

Дизайн:
Антон Леонидович Курносов

Верстка:
Андрей Викторович Трубин

Перевод:
Анна Викторовна Вакалюк, Анна Александровна Немкина, Екатерина Андреевна Деркач
(департамент международных связей УрГУПС), тел. (343) 221-24-86

Автор фотографии на обложке:
Александра Антоновна Бенклевская

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 30.09.14

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Отпечатано в типографии ООО «Велар»,
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 22, п. 4, оф. 6, тел./факс: (343) 350-00-83

Заказ №

© Уральский государственный университет путей сообщения, 2014