

**ИНТЕРАКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

**МОДЕЛЬ ТЕРМОНАГРУЖЕННОСТИ ВАГОНА-ТЕРМОСА
ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГОРЯЧИХ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК**

**О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
СТАНЦИОННЫХ ГОРЛОВИН**

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ
ПОСТРОЕНИЯ СИЛОВОЙ СТРУКТУРЫ
 ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

**ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ
В ПАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ**



TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, 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. Смольянинов 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 Vasilyevich, 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

| | |
|---|----|
| А. С. Мишарин, Н. В. Кащеева. Интерактивное исследование проектируемых железнодорожных станций..... | 3 |
| Е. Н. Тимухина, Н. Е. Окулов. Повышение устойчивости взаимодействия производства и транспорта..... | 7 |
| О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов. Обоснование целевой функции параметров терминальной сети региона..... | 12 |
| О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Ю. С. Никонов. К вопросу консолидации и доставки одиночных и групповых контейнерных отправок в составе контейнерных поездов..... | 15 |
| Е. Э. Червотенко, А. Р. Калинина. Применение методов адаптаций в проектах развития технических станций железнодорожных узлов Дальнего Востока..... | 19 |
| А. А. Жаркова. Эффективность управления вагонами операторских компаний в рамках единой информационной базы..... | 24 |

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

| | |
|---|----|
| А. Б. Левин, А. Э. Павлюков, А. В. Смольянинов. Оценка демпфирующих свойств буксового подвешивания многоосных тележек грузовых вагонов..... | 27 |
| А. В. Намятов, А. Г. Охотников, В. Ф. Лапшин. Модель термонагруженности вагона-термоса для транспортировки горячих металлургических заготовок..... | 33 |
| В. Н. Филиппов, И. В. Козлов, А. В. Смольянинов, Я. Д. Подлесников. К вопросу обеспечения безопасности движения вагонов с увеличенной высотой центра тяжести..... | 39 |
| А. В. Бородин, Ю. А. Иванова, Д. Б. Гритс. Эксплуатационные особенности букс грузовых вагонов..... | 44 |

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

| | |
|--|----|
| П. А. Козлов, Е. Н. Тимухина, В. Ю. Пермикин, Н. Е. Окулов. О пропускной способности станционных горловин..... | 47 |
| В. А. Алпысова, Н. С. Бушуев, Д. О. Миненко. Моделирование и прогнозирование пассажиропотока высокоскоростной магистрали на примере поездов «Сапсан» направления Санкт-Петербург — Москва..... | 50 |
| И. А. Ковалев, В. С. Колокольников. Влияние отказов технических средств на выполнение графика движения поездов..... | 54 |

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

| | |
|--|----|
| И. Л. Парахненко, С. Г. Аккерман. Эффективность управления трением в контакте «колесо — рельс»..... | 58 |
| С. М. Скоробогатов. Иерархия трещинообразования бетона в изгибаемых железобетонных элементах..... | 62 |
| А. В. Шипуля, С. М. Скоробогатов. Основы методики исследования влияния бортовой балки на напряженно-деформированное состояние железобетонной плиты перекрытия..... | 67 |

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

| | |
|---|----|
| И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев, А. Д. Волосников. Анализ освещенности кабины машиниста маневрового тепловоза..... | 73 |
| В. Н. Костюков, А. Е. Цурпаль, А. В. Зайцев. Установка для экспериментальных исследований вибрации узлов подвижного состава в эксплуатации..... | 77 |
| Д. Я. Носырев, А. А. Свечников, А. А. Котышев. Влияние электротермической обработки воздуха и топлива на эффективность работы дизеля..... | 81 |

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

| | |
|---|----|
| Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил. Повышение экологической безопасности и эффективности эксплуатации автотранспорта применением присадки к топливам..... | 84 |
| М. Р. Якимов. Показатели качества организации дорожного движения в городах и методы их оценки..... | 90 |

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Б. А. Аржанников, В. Ф. Григорьев, А. В. Бондаренко. Исследование гармонических составляющих токов в трансформаторном агрегате с вольтодобавочным трансформатором..... | 93 |
|--|----|

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

| | |
|---|-----|
| А. Я. Калинин, А. Н. Грачев. Рациональные принципы построения силовой структуры гибридного электрического транспорта..... | 98 |
| М. Г. Дурандин, И. А. Кузьминых. Обобщенная методика расчета электрических и тепловых полей в пазовой изоляции тяговых электродвигателей локомотивов..... | 102 |

АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ

| | |
|--|-----|
| Ю. В. Могильников. Влияние тяжеловесных поездов на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН..... | 109 |
|--|-----|

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

| | |
|---|----|
| A. S. Misharin, N. V. Kasheeva. Interactive study of designed railway stations..... | 3 |
| E. N. Timukhina, N. E. Okulov. Improving stability of interaction of production facilities and transport..... | 7 |
| O. D. Pokrovskaya, V. M. Samuylov. Substantiation of efficiency function of regional terminal network parameters..... | 12 |
| O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, Yu. S. Nikonov. Regarding the issue of consolidation and delivery of single and group container shipments in container trains..... | 15 |
| E. E. Chervotenko, A. R. Kalinina. The use of adaptation methods in development projects of train stations of Far East railway junctions..... | 19 |
| A. A. Zharkova. Efficiency of managing operating companies' cars within a common database..... | 24 |

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

| | |
|--|----|
| A. B. Levin, A. E. Pavlyukov, A. V. Smolyaninov. Evaluation of damping properties of axle-box suspension in multiaxial freight car bogies..... | 27 |
| A. V. Namyatov, A. G. Okhotnikov, V. F. Lapshin. Thermal loading model of an insulated railcar for transportation of hot steel workpieces..... | 33 |
| V. N. Filippov, I. V. Kozlov, A. V. Smolyaninov, Ya. D. Podlesnikov. Regarding the issue of safe operation of cars with increased height of center of gravity..... | 39 |
| A. V. Borodin, Yu. A. Ivanova, D. B. Grits. Performance specifics of freight car axle boxes..... | 44 |

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

| | |
|---|----|
| P. A. Kozlov, E. N. Timukhina, V. Yu. Permikin, N. E. Okulov. Station neck capacity..... | 47 |
| V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, D. O. Minenko. Modeling and forecasting high-speed route passenger traffic on the example of Sapsan trains on the route Petersburg — Moscow..... | 50 |
| I. A. Kovalev, V. S. Kolokolnikov. Effect of equipment failure on fulfillment of train schedule..... | 54 |

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

| | |
|---|----|
| I. L. Parakhnenko, S. G. Akkerman. Friction control effectiveness in «wheel — rail» contact..... | 58 |
| S. M. Skorobogatov. Hierarchy of concrete cracking in curving concrete elements..... | 62 |
| A. V. Shipulya, S. M. Skorobogatov. Basic research methods to study the influence of edge beam on stress-strain state reinforced concrete floor slab..... | 67 |

ROLLING STOCK AND TRACTION

| | |
|---|----|
| I. V. Kharitonov, B. S. Sergeev, A. D. Volosnikov. Analysis of driver's cab lighting in a shunting locomotive..... | 73 |
| V. N. Kostyukov, A. E. Tsurpal, A. V. Zaytsev. A device for experimental studies of vibration of rolling stock components during operation..... | 77 |
| D. Ya. Nosyrev, A. A. Svechnikov, A. A. Kotyshev. Influence of electrothermal air and fuel treatment on diesel engine performance..... | 81 |

MOTOR TRANSPORT

| | |
|--|----|
| E. R. Magaril, R. Z. Magaril. Improving environmental safety and efficient operation of motor vehicles by using fuel additive..... | 84 |
| M. R. Yakimov. Urban road traffic organization quality and evaluation methods..... | 90 |

ELECTRIC SUPPLY

| | |
|--|----|
| B. A. Arzhannikov, V. F. Grigoryev, A. V. Bondarenko. Study of harmonic current components in transformer unit with booster transformer..... | 93 |
|--|----|

ELECTRIC TRACTION

| | |
|---|-----|
| A. Ya. Kalinichenko, A. N. Grachev. Rational principles for construction of power structure of hybrid electric transport..... | 98 |
| M. G. Durandin, I. A. Kuzmynikh. Generalized method for calculating the electric and thermal fields in slot insulation of locomotive traction motors..... | 102 |

RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

| | |
|--|-----|
| Yu. V. Mogilnikov. Impact of heavy trains on operation of track circuits and continuous automatic locomotive signaling (CALS) equipment..... | 109 |
|--|-----|

УДК 656.21.001.57

Александр Сергеевич Мишарин, доктор технических наук, первый вице-президент ОАО «РЖД»,
генеральный директор ОАО «Скоростные магистрали», Москва,
Наталья Вячеславовна Кашеева, старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИНТЕРАКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Alexander Sergeyevich Misharin, DSc in Engineering, First Vice President of JSC Russian Railways,
General Director of JSC High-Speed Highways, Moscow,
Natalya Vyacheslavovna Kasheeva, Senior Lecturer, Department of Operations Management,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Interactive study of designed railway stations

Аннотация

В статье предлагается интерактивный подход в имитационном моделировании, позволяющий сочетать возможности компьютерной модели и интеллекта человека. Задача исследований — сформировать набор адекватных реакций модели при возникновении трудных ситуаций, т.е. наделить ее необходимой адаптивностью. Для этого модель по значению индикаторов останавливается, а управление передается технологу. Так интерактивная модель более корректно отображает будущие свойства проектируемого объекта.

Ключевые слова: имитационная модель, интерактивный подход, информационное обеспечение, операционное обеспечение, адаптивность.

Summary

The paper proposes an interactive approach to simulation modeling, which allows to combine capabilities of the computer model and human intelligence. The objective of the research task is to create a set of adequate model responses in the event of difficult situations, i.e. provide it with necessary adaptability. For this purpose, the model stops by indicator values, and control is passed to the process engineer. Thus, the interactive model more accurately reflects the future properties of the proposed object.

Keywords: simulation model, interactive approach, information security, operational support, adaptability.

В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. отмечается, что современные «объемные и качественные характеристики транспорта, особенно его инфраструктуры, не позволяют в полной мере и эффективно решать задачи растущей экономики», и ставится задача интенсивного развития транспортной инфраструктуры [1]. В число направлений ее научного обеспечения включается «проведение имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры, в том числе... создание имитационных систем, позволяющих моделировать системы различных видов транспорта». То есть основным методом расчета признается имитационное моделирование.

Разработка принципов и технологии интерактивного моделирования позволит выстроить адаптивную технологию для расчета и исследования систем железнодорожного транспорта и сформировать адекватную модель, которая покажет не только действительную пропускную способность системы, но и уровень возможного использования путей, сортировочных и грузовых устройств, а также локомотивов.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ ИНТЕРАКТИВНОГО ПОДХОДА

Экономическое взаимодействие в стране может быть успешным только в том случае, если оно обеспечено надежными и эффективными транспортными связями. Особенно остро эта проблема стоит именно сейчас, когда в рыночных условиях транспортные потоки стали существенно более многоструйными (причем по разным струям требования к пропуску могут быть различными), а размер переработки на одну и ту же величину потока значительно вырос. Соответственно возникает необходимость обеспечить резервы пропускной способности линий и перерабатывающей способности станций.

Опыт имитационного исследования [2–5] показывает, что в модели важно отобразить не только структуру и технологию станции, но и ее возможную адаптивность. Иначе происходит существенная потеря перерабатывающей способности.

Адаптивность предполагает наличие адекватных реакций на возникающие трудные ситуации. Но предвидеть подобные ситуации при построении модели весьма сложно, особенно для таких станций, как грузовые со многими примыканиями, припортовые и промышленные. Поэтому для завершения процесса предлагается использовать интерактивный подход, т.е. сочетание возможностей компьютерной модели и интеллекта человека. В этом случае при возникновении трудной ситуации модель останавливается, а управление передается технологу. Проанализировав ситуацию, технолог формирует соответствующую реакцию, которая включается в модель. В результате после ряда экспериментов модель будет отображать необходимую гибкость управляемой технологии.

Однако для реализации интерактивного процесса следует: выбрать индикаторы, по состоянию которых определяется возникновение трудной ситуации;

дать технологу полную информацию о состоянии станции и происходящих на ней процессах;

предоставить ему возможность вмешиваться в технологический процесс.

2. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ИНДИКАТОРОВ

Состояние станции можно оценить набором некоторых параметров, таких как число вагонов на станции и в отдельных парках, число работающих маневровых локомотивов и др. Среди многообразия этих параметров есть такие, которые в основном характеризуют работоспособность станции, — назовем их индикаторами. Они могут быть подразделены на две группы — индикаторы состояния и индикаторы процесса.

Станция выполняет свои функции тогда, когда значения индикаторов находятся в заданных границах. При выходе за эти границы станция быстро теряет работоспособность и вскоре «забывается». То есть для индикаторов состояния должно выполняться условие

$$\forall i \in I \left| \underline{\gamma}_i \leq \gamma_i(t) \leq \bar{\gamma}_i, t \in T, \right.$$

где I — множество индикаторов, $I \subset Y$;

Y — множество параметров;

γ_i — индикатор;

$\gamma_i(t)$ — значение индикатора γ_i в момент t ;

$\underline{\gamma}_i, \bar{\gamma}_i$ — соответственно минимальное и максимальное значения индикатора;

T — расчетный период.

Множества $I \equiv \{\underline{\gamma}_i\}$ и $I \equiv \{\bar{\gamma}_i\}$ определяют, по сути, «опасные» границы для состояния системы, при выходе за которые она перестает нормально функционировать.

Для каждой станции набор индикаторов I и множества \underline{I} и \bar{I} будут различными. Выявить их можно только при помощи экспериментов на модели. Характер экспериментов должен быть следующим. В модели станцию доводят до состояния, когда она теряет свою работоспособность. Затем, проанализировав результаты, находят параметры, которые вызвали такой эффект, и определяют граничные значения $\underline{\gamma}_i$ и $\bar{\gamma}_i$. После этого продолжают эксперименты и в конечном счете находят множества I, \underline{I} и \bar{I} .

Как правило, недостаточно опираться на значение одного индикатора состояния. Чтобы оценить близость к «опасной» границе, нужно определить некоторый их набор. В этом смысле более чувствительными нередко являются показатели процесса — они характеризуют скорость приближения к одной из «опасных» границ:

$$\forall j \in J \left| \underline{\gamma}_j \leq \gamma_j(t) \leq \bar{\gamma}_j, t \in T, J \subset Y, \right.$$

где J — множество индикаторов процесса;

$\gamma_j(t)$ — значение индикатора в момент t ;

$\underline{\gamma}_j, \bar{\gamma}_j$ — предельные границы для значения индикатора.

Итак, при переходе состояния за «опасную» границу происходит неконтролируемый рост задержек, станция теряет маневренность и, как следствие, работоспособность (рис. 1).

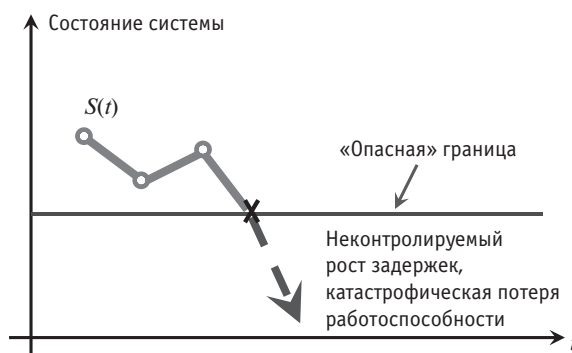


Рис. 1. Схема перехода состояния станции за «опасную» границу

В общем случае пространство возможных состояний представляет собой гиперкуб, ограниченный предельными значениями индикаторов состояния и процесса (рис. 2).

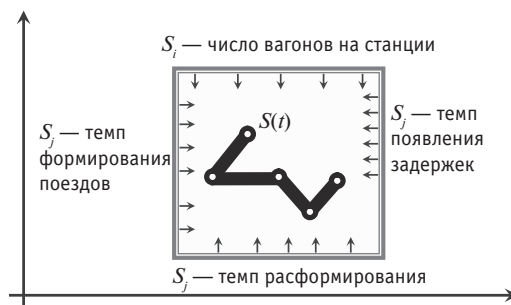


Рис. 2. Пример «опасных» границ для состояния системы

В интерактивном моделировании модель может быть остановлена и по индикаторам состояния, и по индикаторам процесса. При этом следует отметить, что выбирать в качестве индикатора такой параметр, как число вагонов на станции, нецелесообразно, поскольку его рост еще не означает, будто возникли серьезные проблемы. Иными словами, он не обладает должной чувствительностью. Более репрезентативным параметром является уровень заполнения определенного парка.

Нами в качестве моделируемого объекта выбрана сортировочная станция крупного комбината со значительной грузовой работой, обслуживающая промышленный узел. Эксперименты на модели и анализ результатов позволяют установить логическую связь процессов, приводящих к выходу состояния станции за «опасные» границы и к потере ее работоспособности (рис. 3). Логическая цепочка говорит о том, что чем ближе процесс к выходным блокам, тем ближе работоспособность к нижней допустимой границе. Последние два блока (см. рис. 3) означают уже потерю работоспособности.



Рис. 3. Логическая связь процессов, определяющих потерю работоспособности

В теории принятия решений существуют понятия «управление по абсолютному значению отклонения» и «управление по производной». Во втором случае это будет управление по показателям процесса. Поскольку если резко падает темп расформирования, значит, через некоторое время произойдет переполнение предгорочного парка. Наиболее общим показателем процесса можно считать уровень задержек, так как при его существенном росте замедляются все процессы с легкостью предсказуемым результатом.

3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Технолог, для того чтобы принимать обоснованные решения, должен иметь всю необходимую информацию (рис. 4). Ему нужно знать состояние путей, расположение и состояние локомотивов, прогноз прибытия поездов. И в то же время он должен оценивать не только мгновенное состояние системы, но и происходящие в ней процессы.

В частности, чтобы быстро оценить состояние путей в приемо-отправочных (рис. 5) и сортировочном (рис. 6) парках, технолог удобнее видеть уровень заполнения путей в графическом виде — для анализа процесса накопления.

А динамику процесса он может определить по очереди заявок на выполнение операций (рис. 7).

Естественно, технолог должен не только видеть прошлое, но и оценивать ближайшее будущее, т.е. ему необходим прогноз прибытия поездов с разложением составов. Технологу привычнее оценивать состояние системы и протекание процессов по графику исполненной работы.

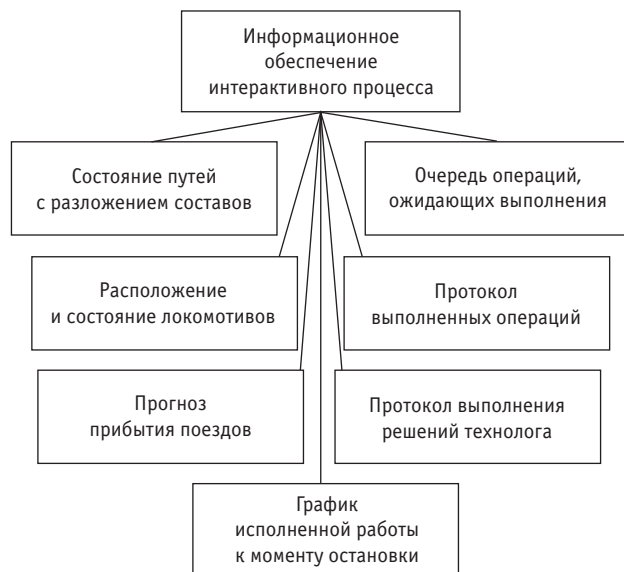


Рис. 4. Информационное обеспечение интерактивного процесса



Рис. 5. Составы с разложением в предгорочном парке

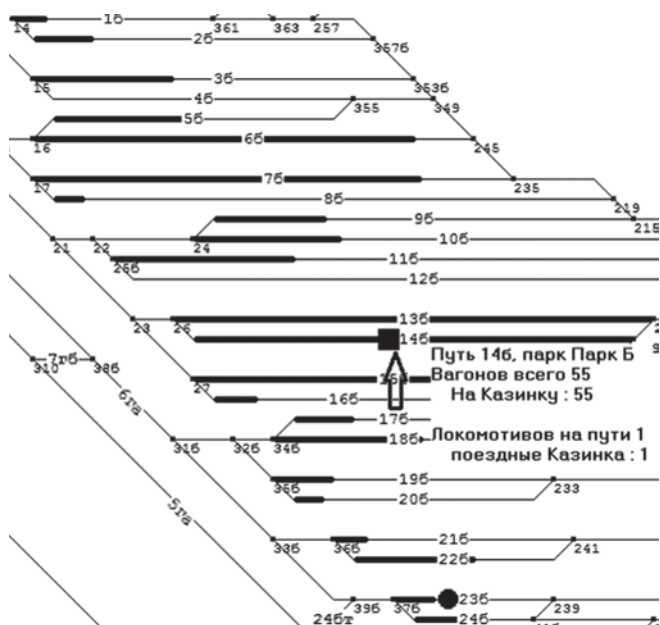


Рис. 6. Состояние сортировочного парка

| Очередь операций | | |
|------------------|--|-----------|
| № | Название операции | Поступлен |
| 2851 | Уборка порожних на 1г (концентрат) | [2] 13:27 |
| 2913 | Полурейс локомотива резервом (КМ) 15 16 [16а п. парка вагонов] | [2] 13:27 |
| 2018 | Расформирование длинного разборочного со Казинки с заездом | [2] 13:30 |
| 288 | Расформирование разборочного со Входной [6г п. парка Пар] | [2] 13:31 |
| 2448 | Вызов поездного локомотива с Восточной стандарт (15б) | [2] 13:36 |
| 2295 | Подача вывозного локомотива на 24 б путь (на Складскую) [24] | [2] 13:38 |
| 2795 | Формирование подачи порожние на Входную 3б путь | [2] 13:38 |
| 2050 | Перестановка состава, известь порожние в парк Г. стандарт [| [2] 13:39 |
| 2292 | Подача вывозного локомотива на 23б путь (на Складскую) [23б] | [2] 13:47 |
| 2543 | Уборка поездного локомотива из-под разборочного со Входн | [2] 13:48 |
| 2554 | Уборка вывозного локомотива из-под состава "с Восточной" [| [2] 13:52 |

Рис. 7. Очередь операций в модели

Представленный перечень информации позволяет технологу проанализировать состояние системы и происходящие в ней процессы, а также сформулировать меры, направленные на удаление состояния от «опасных» границ, т.е. предложить решения, которые не смогла найти модель.

4. ОПЕРАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Во время остановки модели технолог должен иметь возможность выбирать любые решения, предусмотренные технологическим процессом, а также вносить изменения в технологию (рис. 8).

Например, он может включить в очередь любую из возможных технологических операций или удалить какую-то из них. Если технолог включил новую операцию, то после ее выполнения модель сама включит операцию в очередь — продолжение. Кроме того, у него есть возможность изменить очередность выполнения операций или изменить их приоритеты — либо только у операций в очереди, либо у всех операций этого типа. Технолог также может изменить размещение локомотивов.



Рис. 8. Возможные решения технолога в интерактивном процессе

Внося изменения в стандартный технологический процесс, технолог может вывести станцию из критического состояния и передать управление модели. Если модель опять остановится по некоторому индикатору, интерактивный процесс должен быть продолжен.

Таким образом, интерактивное моделирование представляет собой более развитый аппарат для изучения систем железнодорожного транспорта. Это новая технология исследования проектируемых станций и узлов с помощью моделей, когда при принятии решений активными остаются и компьютер, и человек. Сочетание возможностей компьютера с интеллектом и опытом технолога позволяет сформировать рациональную реакцию транспортной системы на возникновение трудных ситуаций, корректно отобразить адаптивность последней и соответственно более точно рассчитать перерабатывающую способность. Кроме того, это поможет предотвратить ошибки при оценке будущих параметров проектируемого объекта, часто встречающиеся на практике и, как следствие, приводящие к значительному непроизводительному расходованию средств.

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008 (дата обращения: 03.02.2014).
2. Козлов П. А., Козлова В. П. Расчет параметров проектируемых транспортных узлов // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 36–38. ISSN 0044-4448.
3. Козлов П. А., Иванов И. В., Осокин О. В. Снижение риска ошибок при расчете транспортных систем. Магнитогорск : МГТУ, 2009. С. 98–103.
4. Тимухина Е. Н., Зартидинов Д. Р. Автоматизированная экспертиза — инструмент при оценке безопасности транспортных процессов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 73–77. ISSN 1815-9400.
5. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 58–62. ISSN 1815-9400.

References

1. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030]. [Electronic resource]. URL: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13008 (date accessed: 03.02.2014).
2. Kozlov P. A., Kozlova V. P. Raschet parametrov proektiruemykh transportnykh uzlov [Dimensioning of designed transportation hubs] // Zheleznodorozhnyy transport. 2008. № 7. P. 36–38. ISSN 0044-4448.
3. Kozlov P. A., Ivanov I. V., Osokin O. V. Snizhenie riska oshibok pri raschete transportnykh sistem [Reducing the risk of errors in design of transport systems]. Magnitogorsk : MG TU, 2009. P. 98–103.
4. Timukhina E. N., Zartdinov D. R. Avtomatizirovannaya ekspertiza — instrument pri otsenke bezopasnosti transportnykh protsessov [Automated examination — a tool for evaluation of safety of transport processes] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 73–77. ISSN 1815-9400.
5. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh [Research methodology to study functional capability of stations in case of process failures] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (31). P. 58–62. ISSN 1815-9400.

УДК 656.212.5

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Николай Евгеньевич Окулов, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ТРАНСПОРТА

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Nikolay Evgenyevich Okulov, Assistant Lecturer, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Improving stability of interaction of production facilities and transport

Аннотация

Промышленные железнодорожные транспортные системы наиболее функционально чувствительны к технологическим сбоям, особенно к сходам подвижного состава. Чтобы не допустить снижения работоспособности станции и предотвратить экономические потери, необходимо сократить вероятность возникновения и негативные последствия технологических сбоев. В статье рассматриваются эксперименты на имитационной модели ИСТРА, с помощью которых установлены элементы, вызывающие наибольший ущерб для транспорта и производства.

Ключевые слова: производство, маневровая работа, сход вагона, технологические сбои, элемент, группа стрелочных переводов, имитационная модель, задержки, эксперимент, ИСТРА.

Summary

Industrial rail transport systems are the most sensitive to process failures, especially derailment of rolling stock. To avoid decline in functionality of the station and prevent economic losses, it is necessary to reduce the likelihood of negative consequences of process failures. The article deals with experiments based on the simulation model ISTRА, using which the components are identified that cause the most damage to transport and production facility.

Keywords: production facility, shunting operations, derailment, process failures, element, pointwork group, simulation model, delays, experiment, ISTRА.

Эффективное взаимодействие производственных систем требует бесперебойной работы транспорта. Это значит, что технологические функции всех подразделений сети железных дорог обязаны выполняться качественно и с должной надежностью [1]. Однако нередко из-за износа рельсов, неисправности вагонов, нарушения ПТЭ и инструкций по содержанию устройств происходят технологические сбои, которые приводят к снижению функциональных возможностей станций, особенно тех, что испытывают высокую загрузку.

Функциональную надежность следует определять по вероятности выполнения технологической операции, элементарного технологического процесса и целостной функции системы [2]. Из-за сильной структурной и технологической связности транспортных систем рассчитать их функциональную надежность по элементарным формулам нельзя. Только подробное моделирование поможет оценить функциональную значимость элементов, которая определяется величиной технологических потерь при выходе этих элементов из строя [3].

Проанализируем, как технологические сбои и негативные последствия от них влияют на транспортно-производственную систему. Для этого в качестве объекта исследования рассмотрим сортировочную станцию *Е* (рис. 1), которая обслуживает металлургический завод. Основное производство предприятия — выпуск непрерывнолитой и горячекатаной заготовки, сортового и фасонного проката из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

В нормальных условиях станция *Е* работает на пределе перерабатывающей способности вагонопотока. Загрузка элементов (стрелочных переводов, путей) достаточно высока (табл. 1, рис. 2 и 3). Именно такие транспортные объекты наиболее функционально чувствительны к технологическим сбоям, особенно при сходах подвижного состава, что обусловлено значительным износом устройств инфраструктуры и большим объемом маневровой работы.

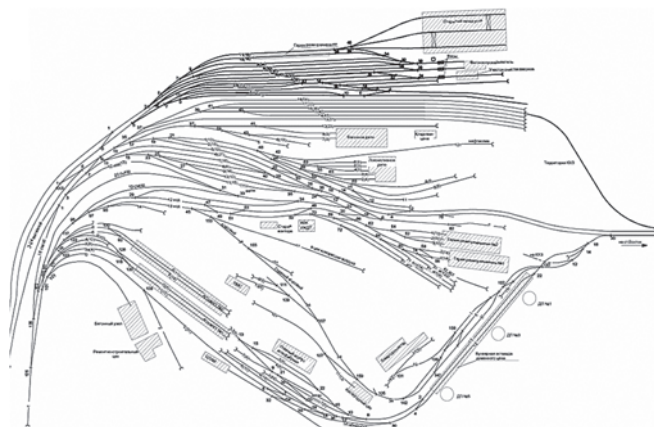


Рис. 1. Схема станции Е

Таблица 1

Общие параметры работы станции Е

| Параметр | Среднее значение |
|---------------------|------------------|
| Прибывшие поезда | 19,2 |
| Отправленные поезда | 19,3 |
| Прибывшие вагоны | 388,2 |
| Отправленные вагоны | 349,7 |
| Непринятые поезда | 0 |
| Непринятые вагоны | 0 |

| Загрузка устройств | | Загрузка и задержка из-за устройств | | Узкие места технологии по подсистемам | | |
|---------------------|------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------|--|
| Потоки и простои | Локомотивы | Узкие места технологии | Узкие места структуры | Узкие места и загрузка структуры | | |
| Локомотив | графически | полн.зан. | меконпр.про | полн.зан. | опер.циклы | |
| Лок. 1 Аглофабрика1 | | 17:25 | 1:07 | 18:32 | 21,1 | |
| Лок. 2 ТЭМ2 | | 15:49 | 3:52 | 19:41 | 11,3 | |
| Лок. 3 ТЭМ2 | | 15:26 | 3:21 | 18:47 | 11,8 | |
| Лок. 4 ТЭМ2 | | 13:42 | 3:23 | 17:05 | 10,1 | |
| Лок. 5 ТЭМ2 | | 12:42 | 4:00 | 16:43 | 9,1 | |
| Лок. 6 ТЭМ2 | | 11:23 | 3:50 | 15:13 | 8 | |
| Лок. 1 Коксостом | | 2:40 | 0:51 | 3:32 | 3,9 | |
| Лок. 1 Круг | | 15:08 | 3:33 | 18:41 | 11,3 | |
| Лок. 2 Круг | | 13:59 | 3:35 | 17:35 | 8,8 | |
| Лок. 3 Круг | | 12:50 | 2:52 | 15:42 | 8,1 | |
| Лок. 4 Круг | | 12:13 | 3:20 | 15:34 | 4,8 | |
| Лок. 5 Круг | | 9:25 | 2:44 | 12:09 | 4,3 | |
| Лок. 6 Круг | | 7:25 | 1:23 | 8:49 | 3 | |
| Лок. 1 Аглофабрика2 | | 19:53 | 1:55 | 21:48 | 10,7 | |
| Лок. 1 Трансферкар | | 0:17 | 4:28 | 4:46 | 6 | |

Рис. 2. Загрузка локомотивов на станции Е

| Загрузка устройств | | Загрузка и задержка из-за устройств | | Узкие места технологии по подсистемам | | |
|---|------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-------|--|
| название | графически | технолог. задержка | вагонами | в целом | | |
| 2 п. парка Теплост №2 | | 2:06 | 0:00 | 21:37 | 23:43 | |
| 3 п. парка Теплост №2 | | 1:59 | 0:00 | 21:38 | 23:37 | |
| 1 п. парка Теплост №2 | | 2:00 | 0:00 | 21:25 | 23:26 | |
| 1 п. парка Теплост №1 | | 2:48 | 0:03 | 21:00 | 23:51 | |
| 2 п. парка Теплост №1 | | 2:14 | 0:03 | 21:13 | 23:31 | |
| Стр.49,50,51 | | 12:50 | 0:00 | 0:00 | 12:50 | |
| Стр.9а,21а,24а | | 1:50 | 0:00 | 9:55 | 11:46 | |
| Стр.6,18,22,31,33,34 | | 11:46 | 0:00 | 0:00 | 11:46 | |
| Стр.9,13,17,19,21,35,37,39,41,43,57,59,61 | | 11:19 | 0:00 | 0:00 | 11:19 | |
| Стр.75,76,90,98,99,116,117,122,123 | | 9:42 | 0:00 | 0:00 | 9:42 | |
| Стр.28,95,97 | | 5:27 | 0:00 | 3:53 | 9:20 | |
| Стр.47,53 | | 8:53 | 0:00 | 0:00 | 8:53 | |
| Стр.5,101к | | 8:32 | 0:00 | 0:00 | 8:32 | |
| Стр.20,48 | | 8:30 | 0:00 | 0:00 | 8:30 | |
| Стр.11,15,23,25,27 | | 3:01 | 0:00 | 5:28 | 8:29 | |

Рис. 3. Загрузка устройств станции Е

Уязвимость станции и производства (величина технологических потерь) при выходе из строя того или иного элемента может быть различной в зависимости от функциональной роли последнего. Необходимо заранее выявить элементы, создающие высокую уязвимость для станции и для производства, и разработать технологические меры, позволяющие ее снизить [2]. Взаимодействие сложной структуры и технологии порождает нелинейные трудно предсказуемые зависимости. Поэтому проверку нужно проводить при помощи экспериментов на подробной модели [4]. Для этих целей нами была использована имитационная система ИСТРА.

Как правило, важность элементов определяется степенью их загрузки. Чтобы проверить это положение, для экспериментов были выбраны две группы стрелочных переводов (СП) с разной загрузкой — СП 6-18-22-34-33-31 и СП 30а-4а (рис. 4).

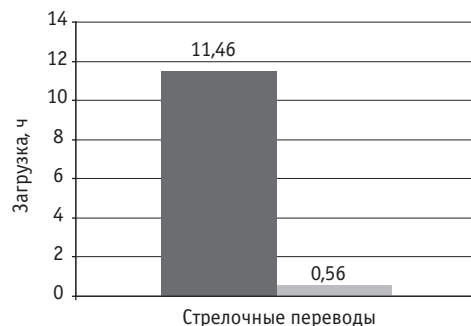


Рис. 4. Загрузка устройств при нормальной работе станции:
■ — СП 6; ■ — СП 30а

На модели исследовались случаи технологических «окон» продолжительностью 60, 120, 180 и 240 мин, предназначенных для устранения схода вагонов. Эксперименты показали, что, хотя общий простой на станции растет при технологических сбоях на наиболее загруженных элементах (рис. 5), в то же время простои в парках увеличиваются по-разному, т.е. парки реагируют неоднозначно (рис. 6).

В частности, с помощью имитационной модели ИСТРА установлено, что группа СП 6, расположенная в парке «Нижняя Сортировка», незначительно влияет на его работу, но оказывает сильное воздействие на простои в соседних парках (СОК, «Средняя Сортировка», «Верхняя Сортировка»).

Технологические сбои также влияют на отдельные элементы инфраструктуры и на производственные линии системы. С помощью структурных связей группы СП 6 (рис. 7) показано, что от технологического «окна» на этой группе стрелок зависит загрузка других элементов инфраструктуры.

Например, при технологическом сбое на СП 6 возникают задержки в группе стрелочных переводов 36с-24 (парк «Средняя Сортировка»), поскольку невозможно выполнить операцию по отцепке и перестановке хвостовых частей составов у прибывших передач. На рис. 8 стрелками изображены функциональные связи этой технологической линии (толщина стрелки характеризует величину функциональной зависимости операций).

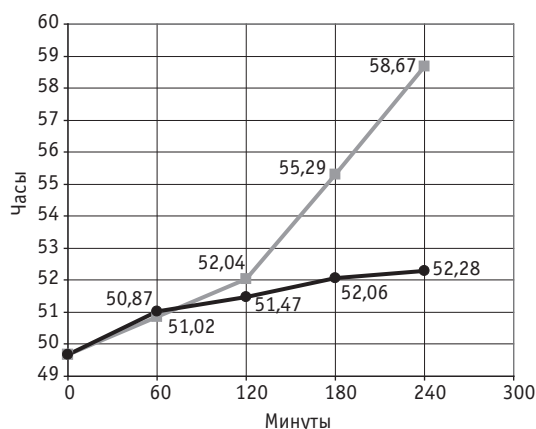
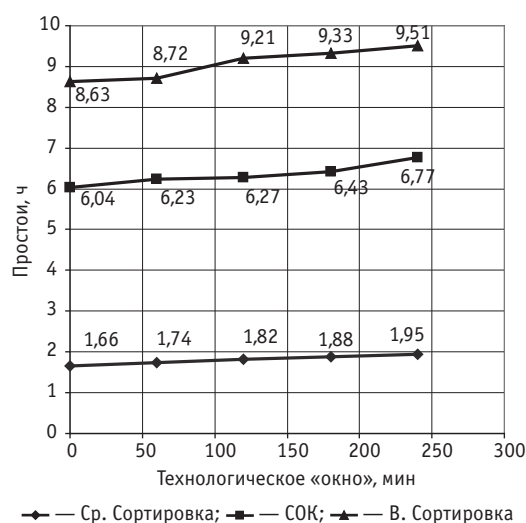


Рис. 5. Простои на станции E из-за технологических сбоев:
— СП 6; — СП 30а



— Сп. Сортировка; — СОК; — В. Сортировка

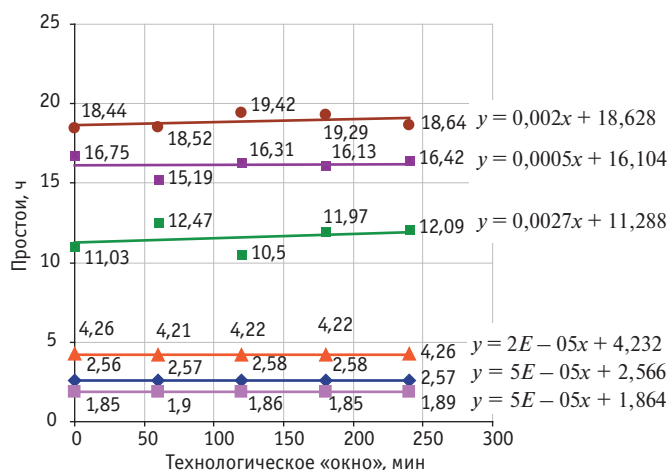


Рис. 6. Простои в парках станции из-за технологических сбоев на СП 6:
— агломерат; — БЭДЦ; — аглофабрика;
— Восток; — теплый 1; — теплый 2;
— линейный (теплый 2); — линейный (теплый 1);
— линейный (Восток); — линейный (аглофабрика);
— линейный (агломерат); — линейный (БЭДЦ)

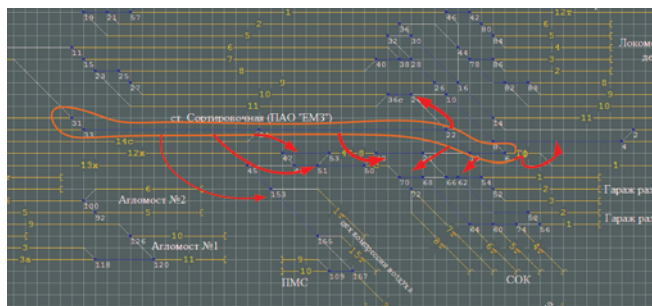


Рис. 7. Структурные связи элемента СП 6-18-22-34-33-31

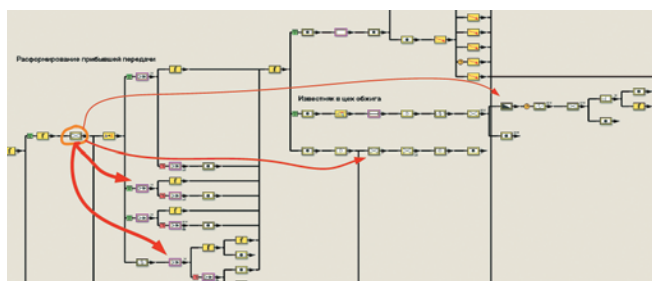


Рис. 8. Функциональные связи операции «перестановка на вытяжку части передачи»

Технологические «окна» на СП 6, как показали эксперименты на модели, приводят к задержкам по формированию подач на разные фронты станции (рис. 9 и 10), а следовательно, к несвоевременной выгрузке прибывших вагонов, т.е. к нарушению гармоничной работы производства.

| элемент | графический | факт | всего | в среднем |
|---|-------------|------|-------|-----------|
| Стр.6,18,22,31,33,34 | | 9:12 | 10:20 | 0:15 |
| операция | графический | факт | всего | в среднем |
| Формирование подачи на Востоке | | 2:46 | 2:46 | 0:10 |
| Формирование подачи Агломерат | | 0:59 | 0:59 | 0:03 |
| Формирование подачи на Восток | | 0:53 | 0:53 | 0:03 |
| Формирование подачи БЭДЦ | | 0:50 | 0:50 | 0:03 |
| Перестановка с 6 пути СОКА | | 0:44 | 0:46 | 0:02 |
| Перестановка с Востока (Пыль, Известь, Шламы) | | 0:26 | 0:32 | 0:01 |
| Перестановка в вытяжку части передачи | | 0:22 | 0:22 | 0:01 |
| Перестановка с 7 пути СОКА | | 0:21 | 0:26 | 0:01 |
| Формирование подачи в тепляк до 6 ваг. | | 0:12 | 0:12 | 0:01 |
| Расформирование в средний и нижний парк | | 0:10 | 0:11 | 0:01 |
| С СОКА на ЕКОЗ | | 0:10 | 0:10 | 0:01 |
| Формирование на БЭДЦ из тепляков | | 0:08 | 0:08 | 0:01 |
| Формирование подачи в тепляк до 8 ваг. | | 0:06 | 0:06 | 0:01 |

Рис. 9. Задержки из-за группы СП 6 при нормальной работе станции

| элемент | графический | факт | всего | в среднем |
|---|-------------|-------|-------|-----------|
| Стр.6,18,22,31,33,34 | | 31:50 | 38:20 | 0:14 |
| операция | графический | факт | всего | в среднем |
| Формирование подачи на Востоке | | 6:58 | 6:58 | 0:28 |
| Формирование подачи на Восток | | 3:14 | 3:14 | 0:13 |
| Перестановка с 6 пути СОКА | | 2:40 | 2:57 | 0:10 |
| Перестановка с Востока (Пыль, Известь, Шламы) | | 2:27 | 2:30 | 0:10 |
| Формирование подачи Агломерат | | 2:09 | 2:09 | 0:08 |
| Перестановка в вытяжку части передачи | | 1:39 | 1:39 | 0:06 |
| Формирование подачи БЭДЦ | | 1:22 | 1:22 | 0:05 |
| Локомотив из тепляков | | 1:16 | 2:55 | 0:05 |
| Заезд локомотива под «петлю» | | 1:02 | 2:15 | 0:04 |
| Формирование на БЭДЦ из тепляков | | 0:55 | 0:55 | 0:03 |

Рис. 10. Задержки из-за группы СП 6 при технологическом сбое 240 мин

Кроме того, технологические сбои на СП 6 влияют на загрузку групп стрелочных переводов 47-53, 48-20, 49-50-51, 70-72-68-64-60-74, 66-62-54-52 (рис. 11).

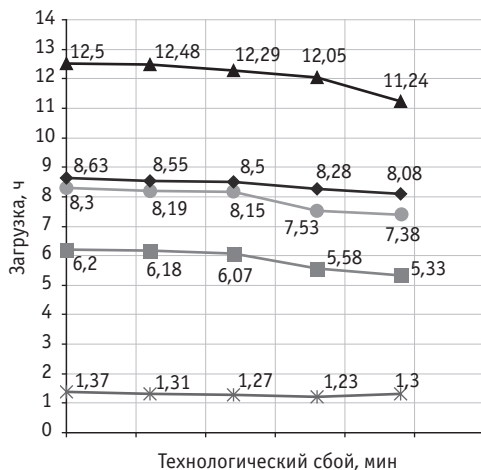


Рис. 11. Загрузка групп стрелок при технологических сбоях на СП 6:

— 47-53; — 48-20; — 49-50-51;
— 70-72-68-64-60-74;
— 66-62-54-52

Такое влияние связано с тем, что на этих группах стрелок происходит формирование подач в тепляки, на бункерные эстакады доменного цеха (БЭДЦ), на склад окатышей и кокса (СОК) и на аглофабрику (см. рис. 9). При сбое на группе СП 6 исключается возможность уборки порожних вагонов с путей парка СОК, соответственно стрелочные элементы инфраструктуры не выполняют операции по перестановке вагонов, их загрузка уменьшается, что приводит к росту простоев в этом парке (см. рис. 6). Из-за невозможности сформировать подачу в тепляк происходит сбой в его работе, нарушается гармоничная и поточная работа производства. Вагоны задерживаются для разморозки, а значит, срывается выгрузка необходимых для производства грузов (рис. 12).



Рис. 12. Функциональные связи операции «формирование подачи в тепляк»

Как видно из приведенных примеров, технологические сбои на группе СП 6 влияют на производственные линии и транспортную систему в целом: значительно увеличиваются простои на станции (см. рис. 5) и в парках (см. рис. 6), происходят задержки при выполнении операций (см. рис. 9 и 10).

Совершенно иное воздействие оказывает элемент инфраструктуры с более низкой загрузкой — группа СП 30а (см. рис. 4). Технологические сбои на ней приводят к незначительному увеличению простоев в парках «9-й пост» и БЭДЦ (рис. 13).

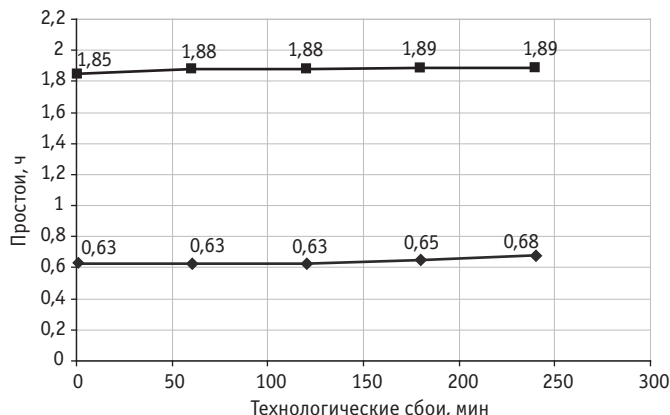


Рис. 13. Простои в парках станции из-за технологических сбоев на СП 30а:

— 9-й пост; — БЭДЦ

Группа СП 30а ведет непосредственно на 12-й выгрузочный путь БЭДЦ. Через нее выполняются операции только по перестановке вагонов с коксом и агломератом. Стоит отметить, что при незначительном увеличении простоев на путях парка БЭДЦ происходит резкий рост задержек выполнения операций из-за этой группы стрелок (рис. 14 и 15). То есть технологический сбой на СП 30а-4а может не только вызвать нарушения в гармоничной работе производства, но и остановить его.

| Потоки и простои | Локомотивы | Узкие места технологии | Узкие места структуры | Узкие места и загрузка структуры |
|---------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| элемент | графический | факт | всего | в среднем |
| Стр.4а,30а | | 0:02 | 0:02 | 0:01 |
| операция | графический | факт | всего | в среднем |
| Перестановка агломерата на БЭДЦ | | 0:01 | 0:01 | 0:04 |
| Перестановка кокса на БЭДЦ | | 0:01 | 0:01 | 0:01 |

Рис. 14. Задержки из-за группы стрелочных переводов 30а-4а при нормальной работе устройств

| Потоки и простои | Локомотивы | Узкие места технологии | Узкие места структуры | Узкие места и загрузка структуры |
|---------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| элемент | графический | факт | всего | в среднем |
| Стр.4а,30а | | 2:31 | 2:31 | 0:01 |
| операция | графический | факт | всего | в среднем |
| Перестановка кокса на БЭДЦ | | 1:49 | 1:49 | 1:56 |
| Перестановка агломерата на БЭДЦ | | 0:41 | 0:41 | 0:43 |

Рис. 15. Задержки из-за группы стрелочных переводов 30а-4а при технологическом сбое 240 мин

Таким образом, в ходе экспериментов на имитационной модели ИСТРА установлено, что разные группы стрелочных переводов оказывают различное влияние на простои в парках станции и на производственные линии.

В частности, элементом, характеризующим уязвимость транспортной подсистемы, является группа СП 6: из-за технологических сбоев на ней происходит резкое увеличение простоев

и задержек, тем более что станция и так работает на пределе своей перерабатывающей способности. С наибольшими потерями для производства связаны сбои в работе группы СП 30а: именно через нее выполняется непосредственная подача вагонов на основную производственную линию предприятия, поэтому даже несущественный сбой на СП 30а способен стать причиной моментальной остановки производства. Следовательно, необходимо уделять повышенное внимание не только элементам инфраструктуры, расположенным в непосредственной близости к производственной линии, но и тем элементам

путевого развития, которые удалены от производства, так как технологические сбои на них приводят к значительным производственным простоям.

Такие неоднозначные зависимости можно установить только с помощью современного аппарата исследования, каким является имитационное моделирование. Для повышения устойчивости взаимодействия транспортной системы и производства необходимо создать реестр устройств, выход из строя которых вызывает наибольшие потери, и обеспечить им первоочередную замену и более тщательное техническое обслуживание.

Литература

1. Цыганов В. В., Савушкин С. А. Последствия реформирования рынка железнодорожных грузоперевозок: методология оценки // Вестник УрГУПС. 2013. № 1 (17). С. 65–78. ISSN 2079-0392.
2. Тимухина Е. Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2012. 45 с.
3. Тимухина Е. Н. Технологические сбои, проблемы расчета и обеспечения функциональной надежности железнодорожных станций // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 1. С. 29–32. ISSN 0236-1914.
4. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 58–62. ISSN 1815-9400.

References

1. Tsyganov V. V., Savushkin S. A. Posledstviya reformirovaniya rynka zheleznodorozhnykh gruzoperevozok: metodologiya otsenki [Consequences of rail freight market reform: assessment methodology] // Herald of USURT. 2013. № 1 (17). P. 65–78. ISSN 2079-0392.
2. Timukhina E. N. Povyshenie funktsionalnoy nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Improving functional reliability of railway stations in case of process failures : DSc in Engineering Thesis]. Ekaterinburg : USURT, 2012. 45 p.
3. Timukhina E. N. Tekhnologicheskie sboi, problemy rascheta i obespecheniya funktsionalnoy nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsiy [Process failures, issues of designing and ensuring functional reliability of railway stations] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. № 1. P. 29–32. ISSN 0236-1914.
4. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh [Research methodology to study functional capability of stations in case of process failures] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (31). P. 58–62. ISSN 1815-9400.

УДК 656.073:338.47

Оксана Дмитриевна Покровская, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), Новокузнецк, Валерий Михайлович Самуйлов, доктор технических наук, профессор кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения, (УрГУПС), Екатеринбург

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СЕТИ РЕГИОНА

Oksana Dmitrievna Pokrovskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Transport Operations Management and Administration, Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, Valeriy Mikhaylovich Samuylov, DSc in Engineering, Professor, Department of World Economy and Logistics, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Substantiation of efficiency function of regional terminal network parameters

Аннотация

В статье рассмотрены ключевые параметры терминальной сети как мезологистической системы и проанализированы факторы, влияющие на них. Предложена целевая функция в стоимостном и качественном аспектах для определения транспортных и пространственно-количественных параметров.

Ключевые слова: терминальная сеть, логистический накопительно-распределительный центр, пространственно-количественные параметры, транспортные параметры, целевая функция.

Summary

The article describes the key parameters of terminal network as a meso-logistics system and analyzes the factors influencing them. The efficiency function is proposed, with value and qualitative aspects to determine the transport and spatial-quantitative parameters.

Keywords: terminal network, accumulation & distribution logistic center, spatial-quantitative parameters, transport parameters, efficiency function.

Идея формирования терминальной сети, или сети логистических накопительно-распределительных центров (ЛНРЦ), заключается в создании взаимоувязанных и об-разующих единое пространство обслуживания центров.

Терминальная сеть региона — это совокупность взаимодействующих и централизованно управляемых узлов — терминалов (ЛНРЦ), обеспечивающая межрегиональную интеграцию и выходы на транспортные коридоры страны.

Логистический накопительно-распределительный центр — система территориально разобщенных объектов, технологически связанных между собой функциями по сбору груза, формированию и расформированию партий, перегрузке на другие виды транспорта, доставке груза конечным потребителям.

От терминальной сети требуется обеспечить эффективную внутрирегиональную дистрибуцию и рациональное управление грузопотоками, инфраструктурную подготовленность выхода продукции на рынки страны и мира. Все ЛНРЦ рассматриваются в их единстве для повышения общей эффективности системы дистрибуции.

В ЛНРЦ совмещаются транспортные, складские и сбытовые функции при предоставлении клиентуре полного набора сопутствующих услуг. По терминальной технологии доставка грузов потребителям идет через сеть ЛНРЦ, на которых происходит накопление, переработка и сервисное обслуживание грузов [1, 2].

Цель данной работы — рассмотреть основные параметры терминальной сети и разработать целевую функцию их определения в количественном и качественном аспектах.

Основные параметры терминальной сети можно классифицировать как пространственно-количественные и транспортные.

К пространственно-количественным параметрам относятся количество и дислокация узлов терминальной сети (ЛНРЦ) и зоны тяготения к ним промышленных предприятий. Это позиционирует терминальную сеть в едином транспортно-экспедиционном пространстве региона.

К транспортным параметрам относятся вид транспорта (автомобильный/железнодорожный, выбирается по каждой транспортной связи), вид доставки (монотранспортная или политранспортная), вид перевозки (прямая или терминальная). При этом вид транспортного обслуживания по каждой связи может быть различным.

На пространственно-количественные параметры терминальной сети оказывают влияние такие показатели, как размещение и плотность размещения крупных промышленно-транспортных узлов, число и дислокация отправителей и потребителей грузов, насыщенность внутренними и внешними транспортно-хозяйственными связями, существующая складская инфраструктура, мощность и направленность грузопотоков, географическое расположение региона, наличие выходов на транспортные коридоры и др.

На транспортные параметры терминальной сети оказывают влияние следующие показатели: развитие (разветвленность) и состав дорожной сети, наличие магистральных транспортных линий, наличие и развитие видов транспорта в регионе, дислокация и взаимное размещение транспортных узлов как пунктов стыка различных видов транспорта и пр.

Помимо перечисленных на пространственно-количественное и транспортное решение терминальной сети воздействуют такие группы показателей: социально-демографические (численность населения, прожиточный минимум); административные (стратегическая программа развития экономики и транспорта региона, реализуемые региональные и правительственные программы); экономические (конкурентные условия на рынке, валовой региональный продукт, объем привлеченных инвестиций); промышленный потенциал (сырьевые ресурсы, объем промышленной продукции, оборот производственных предприятий); торговый потенциал (объемы розничной и оптовой торговли, наличие оптовых и дистрибьюторских компаний); транспортные (развитие транспортно-экспедиционного обслуживания, преимущественное развитие того или иного вида транспорта, особенности транспортного обслуживания промышленных предприятий); географические (географическое положение региона, взаимное расположение крупных промышленно-транспортных и населенных центров); экологическая ситуация.

Характерные черты терминальной сети как сложной логистической системы: основа формирования и функционирования ЕТЭП, структура системы, необходимая для достижения цели функционирования.

В соответствии с указанными параметрами терминальной сети составим целевую функцию.

Методика выбора рационального количества и размещения ЛНРЦ базируется на выборе из множества возможных вариантов одного — наиболее выгодного. В качестве критерия оптимальности принимаем минимум суммарных затрат на обслуживание перевозок $S_{\text{сумм}}$.

Для анализа количественного (стоимостного) аспекта необходимости создания терминальной сети следует разработать, а затем минимизировать целевую функцию по выбранному критерию оптимальности [3]

$$F = \sum_i \sum_j \sum_k \left(\sum_{\alpha_\varphi}^m S_{\text{сумм}_{\alpha_\varphi}}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)} \right) \Rightarrow \min, \quad (1)$$

ограничения: выполнение объема перевозок; $S_{\text{тран}} \geq S_{\text{строит}}$.
Развернутый вид целевой функции:

$$F = \left(\sum_i \sum_k Q_{ik} S_{\text{сумм}(ik)} + \sum_{(m)} Q_{ik} S_{\text{сумм}(k)} \right) + \left(\sum_{(n)} Q_{kj} S_{\text{сумм}(k)} + \sum_k \sum_j Q_{kj} S_{\text{сумм}(kj)} \right) \Rightarrow \min;$$

$$F = \sum_i \sum_j \sum_k [S_{\text{тран}}; S_{\text{строит}}; S_{\text{хран}}; S_{\text{перераб}}; S_{\text{груз}}; S_{\text{сервис}}; T_{\text{достав}}] \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где $S_{\text{сумм}_{\alpha_\varphi}}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$ — суммарные затраты на обслуживание перевозок, руб./год;

S_{ik} — суммарные затраты на этапе обслуживания перевозок грузов объемом Q_{ik} от поставщика i на терминал k , руб./год;

S_k — суммарные затраты на обслуживание терминальной (внутри- и межтерминальной) перевозки, руб./год;

S_{kj} — суммарные затраты на этапе распыления объема перевозок Q_{kj} терминалом k потребителям j , руб./год;

Q_{ik} — количество груза, поступающего от поставщиков i на терминал k , т/сут;

Q_{kj} — количество груза, отправляемого (распределяемого) терминалом k потребителям j , т/сут.

Суммарные затраты складываются из $S_{\text{тран}}$ — затрат на перевозку груза, руб./год; $S_{\text{строит}}$ — затрат на строительство определенного количества ЛНРЦ с учетом вложений в инфраструктуру и внутрискладскую переработку груза, руб./год.

Суммарные затраты на обслуживание перевозок $\sum_{\alpha} S_{\text{сумм}_{\alpha}}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$

на этапе α_φ ($\alpha_1 = ik$ — сбор, $\alpha_2 = k$ — терминальная перевозка, $\alpha_3 = kj$ — распределение) грузодвижения β -м или λ -м видом транспорта (β — доставка автомобильным транспортом, λ — железнодорожным, $\beta + \lambda$ — политранспортная доставка) минимизируются по варианту дислокации и размещения терминалов, поставщику ($\sum_i S_i$), терминалу ($\sum_k S_k$), потребителю

($\sum_j S_j$), этапам m и n (m — прибытие груза от поставщика на терминал, n — отправление груза с терминала потребителю) по каждой транспортной связи.

$S_{\text{строит}}$ — размер затрат, необходимых для строительства и содержания ЛНРЦ, с учетом вложений в инфраструктуру и оснащение, руб./год; $S_{\text{хран}}$ — затраты, связанные с хранением груза на терминале, руб./год; $S_{\text{перераб}}$ — затраты, связанные со складской переработкой груза (маркировка, упаковка, подгруппировка и др.), руб./год; $S_{\text{груз}}$ — затраты, связанные с выполнением грузовых операций (погрузка, разгрузка, перегрузка), руб./год; $S_{\text{сервис}}$ — затраты, связанные с выполнением транспортно-экспедиционного и коммерческо-информационного сервиса, дистрибуции груза, мониторинга и других

логистических услуг, руб./год. Кроме финансовых составляющих, в целевую функцию включается показатель эффективности грузодвижения по терминальной технологии $T_{\text{достав}}$ — время доставки груза, ч [3].

Целевая функция F учитывает только ту группу показателей, влияющих на принятие решения, которая минимизируется для достижения эффективности процессов. Существуют показатели, требующие максимизации. В исследовании допускается предположение, что для анализа качественного (относительного или эффективного) аспекта необходимости создания терминальной сети следует максимизировать целевую функцию по выбранному критерию. Критерий оптимальности — максимум общей эффективности обслуживания перевозок $R_{\text{общ}}$.

Вид целевой функции G :

$$\begin{aligned} G &= [R_{\text{общ}}] \Rightarrow \max; \\ G &= [R_{\text{лог}}; R_{\text{пер}}; R_{\text{соц}}; R_{\text{потреб}}; V_{\text{достав}}] \Rightarrow \max; \\ G &= \sum_{i=1}^i R_{\text{общ}}^{(j,k)} \Rightarrow \max, \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_{\text{общ}}$ — общая эффективность обслуживания перевозки, руб./год.

Общая эффективность обслуживания перевозки $\sum_{\alpha=1}^{\alpha} R_{\text{общ}}^{(\beta;\lambda)}$

на α -м этапе ($\alpha_1 = ik$ — сбор, $\alpha_2 = k$ — терминальная перевозка, $\alpha_3 = kj$ — распределение) грузодвижения β -м или λ -м видом транспорта (β — доставка автомобильным, λ — железнодорожным транспортом, в случае $\beta + \lambda$ — доставка политранспортная) в соответствии с целевой функцией G максимизируется по каждому варианту и складывается из $R_{\text{лог}}$ — эффективности логистического сопровождения грузодвижения, %; $R_{\text{пер}}$ — рентабельности перевозок, %; $R_{\text{соц}}$ — социальной эффективности применения терминальных технологий, %; $R_{\text{потреб}}$ — потребительской привлекательности транспортно-логистических услуг в границах терминальной сети, балл. Эффективность логистического сопровождения грузодвижения $R_{\text{лог}}$ складыва-

ется из своевременности доставки, удобства доставки — во время и точно в указанный пункт, совершенства документационно-информационного сервиса при сохранении всех свойств груза. Социальная эффективность $R_{\text{соц}}$ определяется социальным эффектом (создание новых рабочих мест и повышение заработной платы сотрудников). Потребительская привлекательность транспортно-логистических услуг $R_{\text{потреб}}$ — это культура обслуживания, удобство получения услуг, желание клиентов пользоваться предлагаемыми услугами, насыщенность ассортимента оказываемых услуг. Кроме относительных составляющих, в целевую функцию включается показатель эффективности грузодвижения по терминальной технологии $V_{\text{достав}}$ — скорость доставки груза, км/ч.

Для того чтобы проанализировать влияние количества и размещения терминалов на величину суммарных затрат на обслуживание перевозки, необходимо определить суммарные затраты для каждого из возможных вариантов и сделать вывод о его целесообразности. Максимизация затрат по данной целевой функции позволит выявить наилучшее сочетание количества и размещения терминалов в регионе.

Ограничим область исследования только целевой функцией F , в которой определим основные показатели, наиболее существенно влияющие на принятие итогового (окончательного) решения, т.е. такие показатели количественного аспекта,

как $S_{\text{сумм}}^{(\beta;\lambda)}$ — суммарные затраты на обслуживание перевозки, руб./год; $S_{\text{тран}}$ — затраты на перевозку, руб./год; $S_{\text{строит}}$ — размер затрат, необходимых для строительства (с нуля) или формирования (на базе существующей инфраструктуры) и содержания определенного количества ЛНРЦ, с учетом вложений в инфраструктуру и оснащение, руб./год [3].

Таким образом, поиск решения по предлагаемой целевой функции осуществляется при помощи эвристического метода (итеративный метод направленного перебора вариантов) с дополнительно вложенным расчетным циклом — выбором вида (сочетания видов) транспорта. Варьированием возможных сочетаний количества и дислокации ЛНРЦ, видов транспорта для их обслуживания определяются пространственно-количественные параметры терминальной сети.

Литература

1. Покровская О. Д., Самуйлов В. М., Неволлина А. Д. Инфраструктура международных транспортных коридоров // Инновационный транспорт. 2013. № 3 (9). С. 33–37.
2. Сервис на транспорте : учеб. пособие для студ. вузов / В. М. Николашин, Н. А. Зудилин, А. С. Сеницына и др. ; под ред. В. М. Николашина. М. : Академия, 2008. 272 с.
3. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов. М. : ТрансЛит, 2012. 192 с.

References

1. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M., Nevolina A. D. Infrastruktura mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [International transport corridors infrastructure] // Innovatsionnyy transport. 2013. № 3 (9). P. 33–37.
2. Servis na transporte : ucheb. posobie dlya stud. vuzov [Service in transport industry : a textbook for universities] / V. M. Nikolashin, N. A. Zudilin, A. S. Sinitsyna i dr. ; pod red. V. M. Nikolashina. M. : Akademiya, 2008. 272 p.
3. Pokrovskaya O. D. Formirovaniye terminalnoy seti regiona dlya organizatsii perevozok грузов [Formation of regional terminal network for freight transportation]. M. : TransLit, 2012. 192 p.

УДК 656.073.235

Олег Валерьевич Москвичев, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
Елена Евгеньевна Москвичева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной грузовой и коммерческой работой» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
Юрий Сергеевич Никонов, преподаватель кафедры «Экономика и логистика на транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС)

К ВОПРОСУ КОНСОЛИДАЦИИ И ДОСТАВКИ ОДИНОЧНЫХ И ГРУППОВЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ОТПРАВОК В СОСТАВЕ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ

Oleg Valeryevich Moskvichev, PhD in Economics, Associate Professor, Department of Railway Stations and Junctions, Samara State University of Railway Transport (SamGUPS),
Elena Evgenyevna Moskvicheva, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Freight and Commercial Operations Management, Samara State University of Railway Transport (SamGUPS),
Yuriy Sergeyevich Nikonov, Lecturer, Department of Transport Economics and Logistics, Samara State University of Railway Transport (SamGUPS)

Regarding the issue of consolidation and delivery of single and group container shipments in container trains

Аннотация

Статья посвящена консолидации контейнерных отправок и концентрации контейнеропотоков на регулярных контейнерных поездах разных категорий. Авторами предложен алгоритм принятия решения об эффективности назначения контейнерных поездов на конкретном железнодорожном направлении. Решение принимается на основании значений расчетных технико-экономических параметров для каждой из категорий следования контейнерных поездов, а также с учетом развития инфраструктуры железнодорожного транспорта, текущего состояния и возможного изменения рынка контейнерных перевозок на рассматриваемом направлении.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, контейнерные поезда, организация следования контейнерных поездов, концентрация контейнеропотоков, консолидация грузов.

Summary

The paper is dedicated to consolidation of container traffic and concentration of container shipments on regular container trains in different categories. The authors propose an algorithm to decide on the effectiveness of container trains on a particular railway destination. The decision is made on the basis of calculated technical and economic parameters for each of the categories of container train destinations, as well as with account to the development of railway infrastructure, the current status and possible changes in container transportation market for the destination under review.

Keywords: container transportation, container trains, container trains management, concentration of container traffic, cargo consolidation.

В настоящее время одним из ключевых факторов развития контейнерных перевозок в России является рост внешне-торгового оборота, прежде всего импорта (промышленное, машиностроительное, электротехническое, строительное оборудование, бытовая электроника и электротехника, товары народного потребления и т.д.). Структура импорта, в отличие от преимущественно сырьевого экспорта, как правило, подразумевает использование контейнеров. Другой фактор, обеспечивающий рост потребности в контейнерных перевозках, — общемировая тенденция изменения структуры перевозок в пользу мультимодальности, что по определению требует использования контейнеров.

Растущие объемы импорта в России являются фактором, который был и остается по настоящее время катализатором развития этого сегмента транспортного рынка.

Что касается транзита, то здесь контейнерные перевозки в Российской Федерации занимают далеко не надлежащее место по причине острой нехватки логистического обеспечения. Практически на всем пути следования любого контейнера через территорию страны отсутствуют склады и оборудованные по современным требованиям терминалы станций.

Сегодня торговля во всем мире, в том числе в России, требует от операторов эффективного снижения логистических и транспортных издержек в потребительской цене товара. В решении этой задачи на помощь могут прийти новые транспортные продукты, основанные на технологиях мультимодальности и в первую очередь на использовании преимуществ контейнерных перевозок.

Так, международная практика показывает, что немногим менее половины всех грузовых перевозок «от двери до двери» осуществляется в контейнерных поездах. Это обеспечивает сокращение времени доставки, снижение затрат на перевозку, оптимизацию тарифов, сохранность грузов, информационное сопровождение грузопотоков в едином формате и на всем пути продвижения грузов.

На железных дорогах России в настоящее время, когда формирование и продвижение контейнерных поездов основывается на принципе «по накоплению», поток контейнеров и контейнеропригодных грузов в отсутствие регулярности движения уходит на автотранспорт.

По мнению экспертов и практиков, на железнодорожном транспорте целесообразно использовать конкурентные преимущества других транспортных отраслей. Так, переход к технологии грузовых перевозок в контейнерных поездах позволит создать транспортно-логистическую отрасль, включающую мультимодальный транспорт и современные терминалы, с функциями экспедиции грузов и формирования эффективных транспортных маршрутов движения для комбинированного перемещения грузов [1–4]. Это будет способствовать сокращению транспортных расходов и сроков доставки, что неизбежно повлечет за собой снижение логистических и транспортных издержек в потребительской цене товара. Пример доставки грузов автомобильным транспортом и контейнерными поездами, включающий организацию мультимодальной перевозки через транспортно-логистические центры (ТЛЦ), приведен на рис. 1.

на терминалы-спутники и прочие контейнерные площадки;
терминально-логистические центры;
терминалы в портах и железнодорожные порты.

Кроме того, обе концепции ориентированы на непрерывную переработку контейнеров за счет совершенствования работы опорных терминально-логистических центров и на организацию перевозок в контейнерных поездах следующих категорий:

местный контейнерный поезд — «поезд, осуществляющий перевозки контейнеров между контейнерными площадками/вспомогательными терминалами и интермодальными центрами (имеет формат сборного, участкового или передаточного поезда)» [5];

маршрутный контейнерный поезд — «поезд, осуществляющий контейнерные перевозки между интермодальными центрами, терминалами-хабами, крупными терминалами в портах и погранпереходах» [5];

ускоренный маршрутный контейнерный поезд, в том числе в транзитном сообщении, — «поезд, связывающий терминалы в морских портах и на погранпереходах, обеспечивающий повышенную маршрутную скорость свыше 550 км/сут (свыше 1000 км/сут в транзитном сообщении)» [5].

Однако само по себе принятие стратегий и концепций не добавило понимания, как решать поставленные в этих документах задачи. Для развития и реализации новых транспортных продуктов контейнерных перевозок, таких как регулярные контейнерные поезда, следующие по расписанию, необходимо выполнить ряд технических и технологических мероприятий.

Если рассмотреть все контейнерные поезда, следующие в международном, транзитном и местном сообщении, то можно разделить их на две категории.

1. Поезд «одного клиента» — сервис, налаженный под конкретного грузоотправителя и грузополучателя с оговоренными объемами, сроками, частотой курсирования и тарифами. Сюда можно отнести сервис, который предоставляется для автосборочных предприятий, производителей электроники, крупных торговых сетей. С назначением и формированием данных типов поездов более или менее все понятно, и большинство курсирующих в настоящее время по сети ОАО «РЖД» контейнерных поездов принадлежат именно к этой категории.

2. «Публичный» контейнерный поезд — сформированный из разнородных грузов, принадлежащих разным грузоотправителям и следующих разным грузополучателям. При назначении и формировании таких поездов возникает ряд вопросов, связанных со сроками накопления, регулярностью, а также затратами на маневровые операции.

Чтобы решить эти проблемы, необходимо разработать методику определения эффективности назначения контейнерных поездов, их категории, оптимального времени накопления, длины и веса по каждому отдельно взятому направлению и назначению.

Нами был разработан и предлагается к использованию следующий алгоритм определения возможности и целесообразности назначения контейнерных поездов на конкретном железнодорожном направлении (рис. 2).

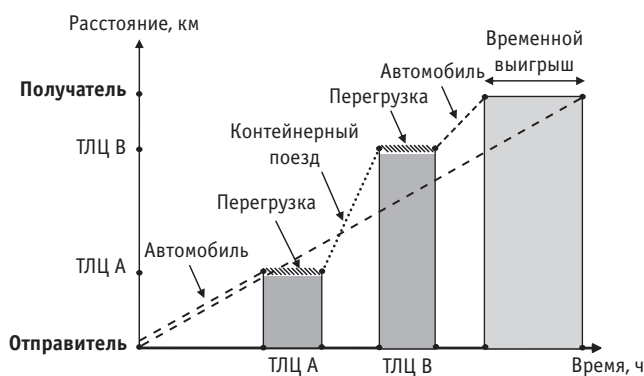


Рис. 1. Организация мультимодальной перевозки через терминально-логистические центры:

— автомобиль; — контейнерный поезд;
 \\\\\\\\\\\ — перегрузка

С целью долгосрочного планирования и реализации системы контейнерных перевозок на железных дорогах России был принят ряд документов, таких как «Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге ОАО «РЖД» [5] и «Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации» [6], в которых предложена классификация объектов контейнерной инфраструктуры по объему перерабатываемых контейнеров и функциональным особенностям. Согласно данной классификации, все инфраструктурные объекты подразделяются [5]:

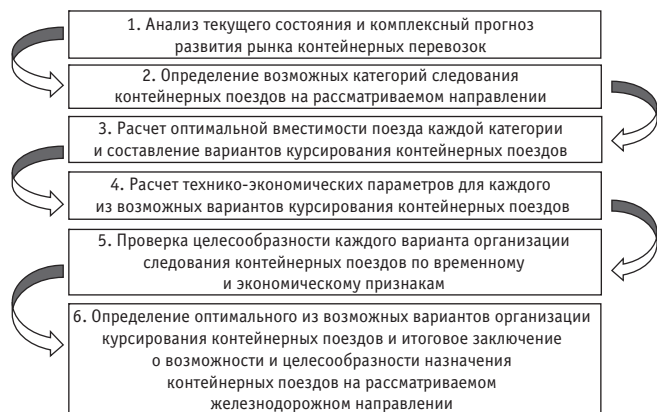


Рис. 2. Алгоритм определения возможности и целесообразности назначения контейнерных поездов на конкретном железнодорожном направлении

На первом этапе дается комплексный прогноз развития рынка контейнерных перевозок, который предполагает:

1) определение объемов контейнеропригодной продукции региона или рассматриваемого направления по следующим признакам:

технологическому — из всего объема продукции, производимой в регионе, определяется объем продукции, пригодной к перевозке в универсальных или специализированных контейнерах;

транспортно-логистическому — устанавливается продукция, требующая транспортировки из региона ее производства и перегрузки с одного вида транспорта на другой в процессе доставки;

экономическому — определяется продукция, стоимость которой значительно выше стоимости перевозки, а убыток грузовладельцев из-за возможной порчи груза при транспортировке намного выше разницы между тарифом на перевозку в контейнере и тарифом на перевозку альтернативным способом;

2) определение существующих объемов контейнеропотоков на железнодорожном направлении или в регионе;

3) анализ существующих объемов контейнеропотоков на других видах транспорта на рассматриваемом направлении или в регионе, а также определение объемов, которые можно привлечь на железнодорожный транспорт.

На втором этапе определяются возможные категории следования контейнерных поездов на выбранном направлении: местный контейнерный поезд, маршрутный контейнерный поезд или ускоренный маршрутный контейнерный поезд. Категория устанавливается исходя из объемов, назначения контейнеров и существующей инфраструктуры продвижения контейнеропотока.

На третьем этапе рассчитывается оптимальная вместимость поезда каждой категории с учетом выполнения условия $E_{кпi+1} > E_{кпi}$, где $E_{кпi}$ — стоимость доставки контейнера в контейнерном поезде.

На основании рассчитанных значений составляются все возможные варианты курсирования местных, маршрутных и ускоренных маршрутных контейнерных поездов, которые обеспечат перевозку месячных объемов грузов в контейнерах ($var \sim M_{кп}^i, N_{кп}^i$).

На четвертом этапе для каждого из возможных вариантов и категорий контейнерных поездов рассчитываются следующие параметры:

время, необходимое для накопления контейнеров ($t_{нак}^{кп}$);
время на грузовые операции ($t_{гр}^{кп}$);
время на формирование-расформирование контейнерного поезда ($t_{форм/расф}^{кп}$);
время нахождения контейнерного поезда в движении ($t_{дв}^{кп}$);
нормативный срок доставки грузов железнодорожным транспортом контейнерной отправкой ($t_{дост}^{ко}$);
затраты, связанные с накоплением контейнеров ($E_{нак}^{кп}$);
затраты на формирование-расформирование контейнерного поезда ($E_{форм/расф}^{кп}$);
затраты, зависящие от продолжительности нахождения контейнерного поезда в движении ($E_{дв}^{кп}$);
затраты на грузовые операции ($E_{гр}^{кп}$);
затраты, связанные с обгоном грузовых поездов контейнерными поездами ($E_{обг}^{кп}$);
экономия эксплуатационных затрат от проследования контейнерных поездов ($\Xi_{просл}^{кп}$).

На пятом этапе проверяется целесообразность каждого варианта организации следования контейнерных поездов по временному и экономическому признаку.

Суммарное время, необходимое на накопление контейнеров на станции, на выполнение грузовых операций, на формирование-расформирование контейнерного поезда и на проследование контейнерного поезда, не должно превышать расчетного на данном направлении срока доставки грузов контейнерной отправкой, т.е. $t_{нак}^{кп} + t_{гр}^{кп} + t_{форм/расф}^{кп} + t_{дв}^{кп} \leq t_{дост}^{ко}$.

Также затраты, связанные с накоплением контейнеров на станции, затраты на грузовые операции, формирование-расформирование контейнерных поездов, организацию их проследования и затраты на обгон грузовых поездов контейнерными поездами должны быть меньше экономии эксплуатационных затрат от проследования контейнерного поезда, т.е. $E_{нак}^{кп} + E_{гр}^{кп} + E_{форм/расф}^{кп} + E_{дв}^{кп} + E_{обг}^{кп} \leq \Xi_{просл}^{кп}$.

В случае если ни один из возможных вариантов не удовлетворяет условиям пятого этапа, необходимо изменить условия, определяющие временные и экономические показатели перевозки контейнеров в составе контейнерного поезда ($t_{нак}^{кп}, t_{гр}^{кп}, t_{форм/расф}^{кп}, t_{дв}^{кп}, E_{нак}^{кп}, E_{гр}^{кп}, E_{форм/расф}^{кп}, E_{дв}^{кп}, E_{обг}^{кп}$). В частности, для этого могут потребоваться изменение периода накопления контейнеров на станции, пересмотр технологии работы с контейнерными поездами на станции отправления и назначения, проведение мероприятий по изменению ограничений объектов инфраструктуры на станциях и перегонах.

На шестом этапе, если вариантов организации курсирования контейнерных поездов, удовлетворяющих условиям пятого этапа, несколько, из возможных вариантов выбирается оптимальный.

Затем после проверки соответствия инфраструктуры железнодорожного транспорта на выбранном направлении условиям, необходимым для осуществления перевозок по предложенному оптимальному варианту, делается итоговое заключение о возможности и целесообразности назначения контейнерных поездов на этом направлении (рис. 3).

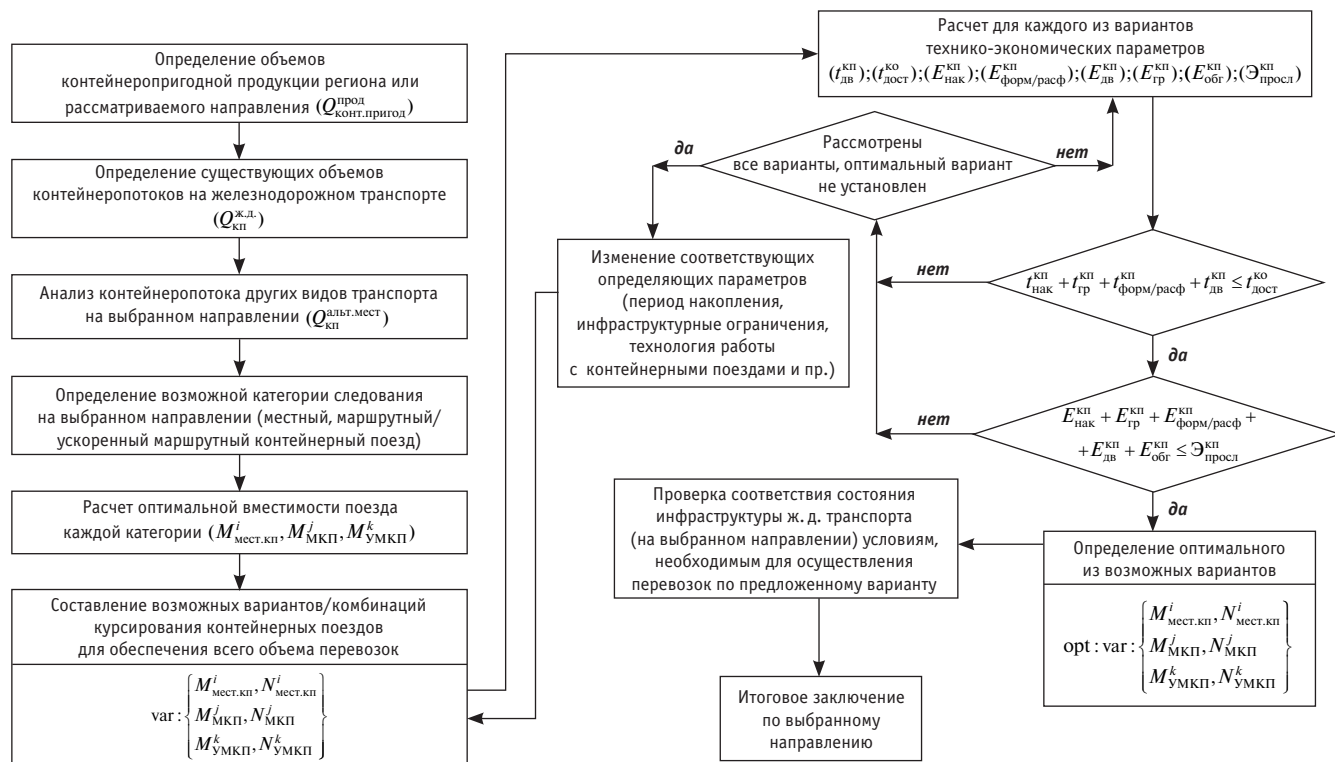


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения возможности и целесообразности назначения контейнерных поездов на конкретном железнодорожном направлении

Предлагаемый алгоритм определения возможности и целесообразности назначения контейнерных поездов является важным элементом внедрения технологии организации регулярных контейнерных перевозок. Эта технология предусматривает обеспечение непрерывной переработки контейнеров на железнодорожном транспорте и переключение всех объемов контейнеров и контейнеропригодной продукции на регу-

лярные контейнерные поезда различных категорий. Кроме того, предлагаемый алгоритм может быть использован при разработке стратегических мероприятий по развитию инфраструктуры национальной контейнерной транспортной системы, ее объединению в технологическую сеть и созданию условий для повышения уровня контейнеризации грузов.

Литература

1. Бенсон Д., Уайтхед Дж. Транспорт и доставка грузов. М. : Транспорт, 1990. 278 с.
2. Гагарский Э. А., Кириченко С. А., Трихунков М. Ф. Тенденции развития контейнерных транспортно-технологических систем на современном этапе // Бюллетень транспортной информации. 2011. № 2. С. 3–7.
3. Резер С. М. Контейнеризация грузовых перевозок / РАН. М. : ВИНТИ, 2012. 678 с.
4. Москвичев О. В., Никонов Ю. С. К вопросу повышения эффективности контейнерных перевозок // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 22–24. ISSN 1815-9400.
5. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5103&id=5932 (дата обращения: 17.03.2014).
6. Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации. М. : ОАО «РЖД», 2011. 95 с.

References

1. Benson D., Uaytkhed Dzh. Transport i dostavka грузов [Transport and delivery of goods]. М. : Transport, 1990. 278 p.
2. GagarSKIY E. A., Kirichenko S. A., Trikhunkov M. F. Tendentsii razvitiya konteynernykh transportno-tekhnologicheskikh sistem na sovremennom etape [Current development trends of container transport process systems] // Byulleten transportnoy informatsii. 2011. № 2. P. 3–7.
3. Rezer S. M. Konteynerizatsiya грузовykh perevozok [Containerization of freight traffic] / RAN. М. : VINITI, 2012. 678 p.
4. Moskvichev O. V., Nikonov Yu. S. K voprosu povysheniya effektivnosti konteynernykh perevozok [Regarding the issue of improving the efficiency of container transportation] // Transport of the Urals. 2009. № 4 (23). P. 22–24. ISSN 1815-9400.
5. Kontseptsiya kompleksnogo razvitiya konteynernogo biznesa v kholdinge OAO «RZhD» [Concept of integrated development of container business in JSC Russian Railways]. [Electronic resource]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5103&id=5932 (date accessed: 17.03.2014).
6. Kontseptsiya sozdaniya terminalno-logisticheskikh tsentrov na territorii Rossiyskoy Federatsii [A concept of creating terminal and logistics centers in the Russian Federation]. М. : OAO «RZhD», 2011. 95 p.

УДК 656.212.021.5 (571.6)

Елена Эдуардовна Червотенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск,
Анна Робертовна Калинина, старший преподаватель кафедры «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АДАПТАЦИЙ В ПРОЕКТАХ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЗЛОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Elena Eduardovna Chervotenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Transport Processes and Logistics, Far Eastern State University of Railway Transport (DVGUPS), Khabarovsk,
Anna Robertovna Kalinina, Senior Lecturer, Department of Transport Processes and Logistics, Far Eastern State University of Railway Transport (DVGUPS), Khabarovsk

The use of adaptation methods in development projects of train stations of Far East railway junctions

Аннотация

В статье рассматриваются варианты развития технических станций в условиях роста объемов транзитных перевозок. Впервые проведено упорядочивание мероприятий по модернизации станционного комплекса в соответствии с методами управления адаптациями сложных систем. На примере станции Комсомольск-Сортировочный проиллюстрирована реализация этих методов. Показано, что их использование позволяет рационально распределять трудовые и материальные ресурсы, капитальные вложения, внедрять на разных этапах наращивания мощностей пропускной способности железнодорожных станций определенные виды организационно-технологических или реконструктивных мероприятий.

Ключевые слова: транзитный железнодорожный узел, технические станции, перспективный транзитный поездопоток, методы управления адаптациями, параметрическая адаптация, конструктивная адаптация, системная адаптация, пропускная способность станций, этапное наращивание мощностей станций.

Summary

The article describes various options for the development of train stations in the context of transit traffic growth. For the first time the measures have been arranged by modernization of station complex in accordance with adaptation management methods applied to complex systems. Implementation of these methods is illustrated using the example of Komsomolsk-Sorting Station. It is shown that their use enables to rationally allocate labor and material resources, capital investments, introduce certain types of organizational, process or reconstruction measures at different phases of expanding railway station capacity.

Keywords: transit railway junction, train stations, prospective transit train traffic, adaptation management techniques, parametric adaptation, structural adaptation, system adaptation, stations capacity, phased capacity expansion of stations.

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением экономического развития Дальнего Востока является его ориентация на связи со странами АТР. Через регион проходят крупнейшие железнодорожные магистрали — Транссибирская и Байкало-Амурская, имеющие выход к дальневосточным портам, что способствует росту объемов внешнеторговых операций и увеличению транзитного грузопотока. В перспективе при эффективном использовании евроазиатских транспортных коридоров ожидается рост по Транссибу до 100 млн т грузов в год, а по мере освоения природных ресурсов в зоне БАМа и развития инфраструктуры морских портов Ванино и Советская Гавань — увеличение транзитного грузопотока Байкало-Амурской магистрали до 105,5 млн т [1, 2].

Расширение транспортно-экономических связей России на Дальнем Востоке, реализация ряда программ добывающей отрасли в зоне БАМа и проектов по развитию морских портов приведет к повышению нагрузок на железнодорожную инфраструктуру региона, что потребует ее развития и модернизации.

Актуальность проблемы продиктована тем, что в настоящее время наличная пропускная способность технических станций железнодорожных узлов Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей имеет очень низкие резервы. Практически ни одна из этих станций (Бамовская, Тында, Известковая, Новый Ургал, Комсомольск-Сортировочный, Ванино и др.) сегодня не готова к приему заявленных транзитных потоков.

Цель настоящей работы — на основе методов адаптаций исследовать возможности развития технических станций, этапного наращивания их мощностей и модернизации инфраструктуры в условиях роста транзитного поездопотока.

1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ К СТАНЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

Обеспечение беспрепятственного пропуска транзитного поездопотока, включая его обслуживание, является одним из основных видов деятельности технических станций. На них выполняется осмотр составов транзитных поездов бригадами ПТО и ПКО, выявляются неисправности подвижного состава, производится смена локомотивов, локомотивных бригад и пр.

Главная проблема железнодорожных станций — их низкая способность работать в условиях высоких загрузок. Лимитирующими звеньями пропускной способности могут быть различные устройства, например горловины станций, парки путей, а также отсутствие электрификации, необходимого количества бригад осмотрщиков и т. д. Вопросы повышения пропускной способности станций можно решать технологически — с помощью методов параметрической адаптации системы управления, а можно и реконструктивно — на основе методов структурной и системной адаптации [3] путем этапного наращивания мощностей.

Мероприятия, не требующие переустройства станции или ее элементов, но имеющие оперативное решение, реализуются с помощью метода параметрической адаптации. Мероприятия среднесрочной перспективы, в основе которых лежит реконструкция устройств, решаются методами структурной адаптации. При коренном переустройстве станции и изменении технологии работы железнодорожного узла используется метод системной адаптации. Такая иерархия методов позволяет определить вид, сложность необходимых мероприятий, затраты на их осуществление на разных этапах освоения растущих объемов транзитной работы (табл. 1).

Как видно из табл. 1, все три уровня адаптации системы управления решают одну задачу — обеспечить достижение поставленных целей. Каждый последующий уровень адаптации имеет постоянную времени на несколько порядков выше, чем предыдущий, т. е. осуществляется значительно медленнее. Это обстоятельство учитывается при создании системы адаптации: ее верхние уровни включаются в том случае, если нижние не могут эффективно приспособить систему к новым условиям.

Работа, выполняемая на станциях, влияет на тип и мощность их устройств. В свою очередь, мощность устройств оказывает воздействие на пропускную и перерабатывающую способность станций и зависит от многих параметров. Так, из-за недостаточной мощности происходят задержки поездов по приему станцией или вынужденные простои составов на станционных путях, ограничение пропускной и перерабатывающей способности станции. В то же время избыточная мощность приводит к дополнительным ежегодным затратам на содержание устройств.

В настоящее время существенной проблемой Дальневосточной железной дороги являются простои составов в ожидании технического обслуживания и в ожидании поездных локомотивов, готовых к работе. Как показал анализ, техническое обслуживание составов при работе в бригаде от одной до четырех групп осмотрщиков составляет 34–68 мин, а на ожидание технического осмотра затрачивается до 40 мин.

Вопрос о рациональном числе бригад осмотрщиков и входящих в их состав групп можно решить, если сопоставить стоимость простоя в ожидании технических операций и затраты, связанные с содержанием штата бригад ПТО. При установленных размерах движения суммарные годовые затраты на простой подвижного состава в ожидании технического обслуживания и на содержание штата осмотрщиков должны быть наименьшими.

Один из опытных расчетов (для среднего числа вагонов, равного 71, при норме на осмотр одного вагона 2 мин) представлен в виде графиков (рис. 1 и 2). На первом графике (см. рис. 1) показаны функции времени ожидания технического обслуживания в зависимости от количества обрабатываемых поездов $N_{\text{ост}}$, загрузки $\rho_{\text{пто}}$ и численности K ($K = 2, 4, 6, 8$ чел.) бригады ПТО.

На втором графике (см. рис. 2) показано, как изменяются суммарные затраты ΣZ , связанные с простоем составов в ожидании обслуживания и с работой осмотрщиков. Точки пересечения функций означают экономически оправданные переходы к большей численности бригады ПТО.

Таблица 1

Управление адаптацией станционных систем к росту транзитного грузопотока

| Методы адаптации | | | | | |
|---|---|---|--|--|---|
| Параметрическая | | Структурная | | Системная | |
| Узкое место | Управление | Узкое место | Управление | Узкое место | Управление |
| Простой составов в ожидании технического обслуживания | Увеличение числа групп осмотрщиков или бригад ПТО | Низкая пропускная способность горловины | Переустройство горловины | Невозможность развития существующего приемо-отправочного парка | Строительство нового транзитного парка (реконструкция) |
| Простой поездов в ожидании поездных локомотивов | Увеличение резерва поездных локомотивов | Низкая пропускная способность приемо-отправочного парка | Увеличение числа путей в парке | Невозможность развития станции | Вывоз (частичный вывоз) транзитной работы на станции узла |
| Неравномерность прибытия маршрутов | Переход на гибкую специализацию путей | Недостаточность длины приемо-отправочных путей | Удлинение путей | | |
| Низкая перерабатывающая способность | Механизация/автоматизация горки | Низкая перерабатывающая способность | Реконструкция сортировочных устройств, строительство горки | | |

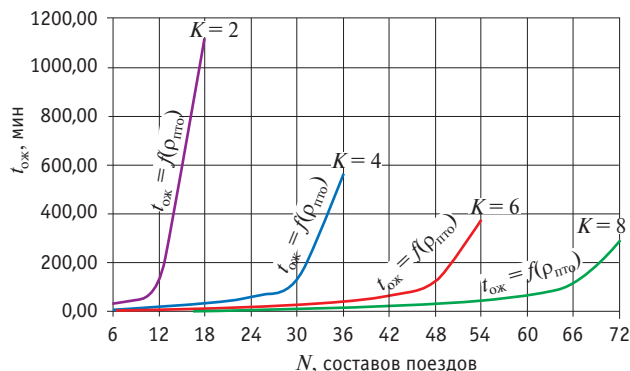


Рис. 1. Зависимость простоя составов в ожидании технического обслуживания от численности и загрузки бригады ПТО, количества обрабатываемых составов

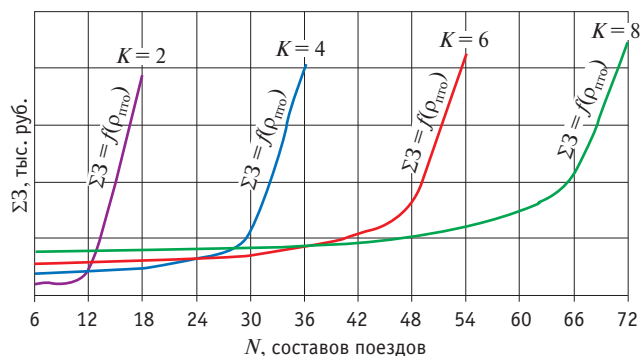


Рис. 2. График суммарных затрат, связанных с простоем составов в парке в ожидании обслуживания бригадой ПТО

При значительном росте перевозок выполнение мероприятий в соответствии с методами параметрического управления позволит облегчить работу станций, но не решит главной проблемы, которая заключается в недостаточном количестве и длине путей существующих парков, обслуживающих, наряду с транзитными поездами, в основном поезда своего формирования.

Вопросы достаточности путевого развития решаются методами структурной адаптации, которая предполагает реконструкцию отдельных элементов станции (удлинение путей, переустройство горловин, добавление числа путей в парках и др.). Как правило, методы параметрической и структурной адаптации рассматриваются комплексно.

При значительном росте размера движения и ограниченности станционных территорий может возникнуть необходимость в альтернативных вариантах развития технических станций, например, таких как:

строительство новых отдельных транзитных парков непосредственно на технической станции (при наличии свободных площадей);

вынос части транзитной работы на промежуточные станции узла.

Подобная ситуация характерна для узловых технических станций Восточного полигона БАМа. Таким образом, развитие транзитного железнодорожного узла необходимо рассматривать в комплексе по альтернативным вариантам.

2. РАЗВИТИЕ КОМСОМОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО УЗЛА В СВЯЗИ С ОСВОЕНИЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОК БАМА

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [1] предполагает к 2030 г. рост грузопотоков через Байкало-Амурскую магистраль до 105,5 млн т в год против 22 млн т в настоящее время (рис. 3). В основном это связано с реализацией долгосрочной программы развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [4], которая предусматривает мероприятия по увеличению объемов поставок угля на атлантический и азиатско-тихоокеанский рынки.

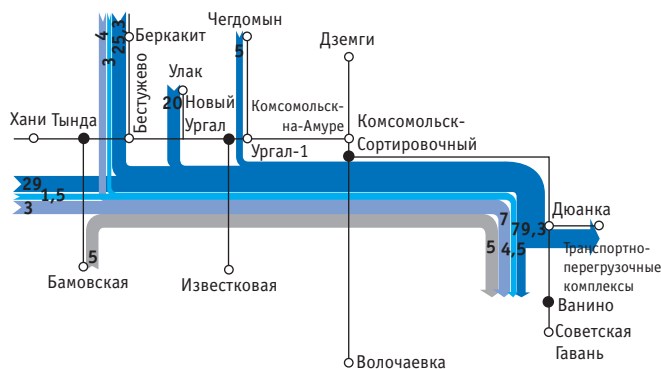


Рис. 3. Схема продвижения перспективного грузопотока по Северному широтному ходу, млн т/год:
■ — уголь; ■ — нефть; ■ — лес, пиломатериалы;
■ — железорудные концентраты

Из схемы, представленной на рис. 3, видно, что в работе с планируемыми объемами перевозок ключевая роль отводится Комузольскому узлу, так как весь перспективный поездопоток назначением в адрес портов Ванино и Советская Гавань будет следовать через него [5]. Обслуживание транзитного потока в порты Ванино-Совгаванского узла производится на станции Комузольск-Сортировочный. Планируемые в соответствии с программой развития Северного широтного хода объемы транзитных перевозок через Комузольск-Сортировочный приведены в табл. 2.

Анализ роста транзитного поездопотока по станции Комузольск-Сортировочный представлен на диаграмме (рис. 4).

Таким образом, к 2030 г. планируемый транзитный поток через станцию Комузольск-Сортировочный должен вырасти почти в 15 раз.

Для анализа пропускной способности перспективного поездопотока сделан расчет пропускной способности по назначенным периодам 2015, 2020 и 2030 гг. с учетом различной загрузки поездных локомотивов [6, 7]. В настоящее время острой проблемой на ДВЖД является нехватка таких локомотивов. В связи с этим средний простой транзитного вагона без переработки на станции составляет более 7 ч.

Графическое сопоставление расчета потребной и наличной пропускной способности приемо-отправочного парка В для существующих размеров движения (рис. 5) наглядно демонстрирует достаточность путевого развития парка.

Таблица 2

Планируемые объемы транзитной работы станции Комсомольск-Сортировочный

| Назначение | 2013 г. | | 2015 г. | | 2020 г. | | 2030 г. | |
|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| | Объем грузов, млн т | Размеры движения, поездов | Объем грузов, млн т | Размеры движения, поездов | Объем грузов, млн т | Размеры движения, поездов | Объем грузов, млн т | Размеры движения, поездов |
| Волочаевка — Ванино | 3 | 6 | 9 | 7 | 10 | 10 | 10 | 9 |
| Ургал-1 — Ванино | 19 | 16 | 39,8 | 32 | 60,8 | 48 | 95,5 | 65 |
| Ванино — Волочаевка | 1 | 6 | 2 | 7 | 7 | 10 | 7 | 9 |
| Ванино — Ургал-1 | 1 | 16 | 2 | 32 | 4,2 | 48 | 4,2 | 65 |
| Всего | 24 | 44 | 52,8 | 78 | 82 | 116 | 116,7 | 148 |

Примечание. В обратном направлении поездопоток следует порожним.

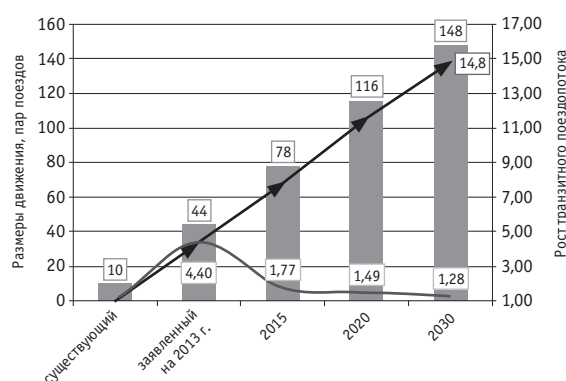


Рис. 4. Рост планируемых объемов транзитной работы на станции Комсомольск-Сортировочный:

■ — размеры движения, пар поездов;
— — отношение роста транзитного поездопотока по годам;
— — общий рост размеров транзитного поездопотока

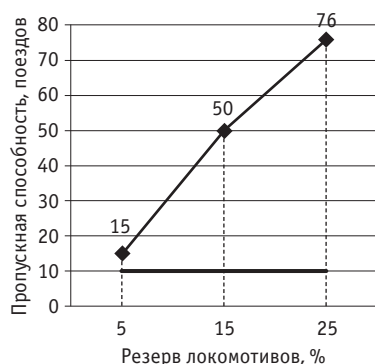


Рис. 5. Диаграмма сопоставления потребной и наличной пропускной способности парка В для существующих размеров движения:

◆ — наличная пропускная способность парка В, поездов;
— — потребная пропускная способность, поездов

Последующее сравнение потребной и наличной пропускной способности показывает, что для стабильной работы станции при обработке 78 пар поездов в сутки необходим резерв поездных локомотивов в 15–25% (рис. 6). Таким образом, использо-

вание метода параметрической адаптации (увеличение числа поездных локомотивов) позволит повысить пропускную способность станции без проведения реконструктивных мероприятий.

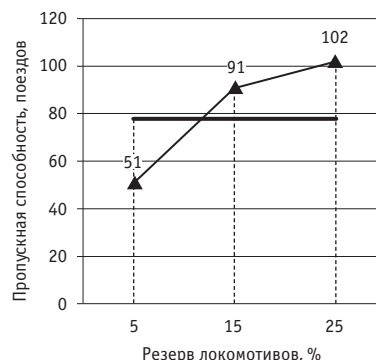


Рис. 6. Диаграмма сопоставления потребной и наличной пропускной способности парка В в 2015 г.:

▲ — 2015 г.; — — потребная пропускная способность, поездов

Дальнейший анализ (рис. 7) показывает, что с заявленным транзитным поездопотоком станция не справится. Следовательно, к 2020 г. необходимо увеличить мощность транзитного парка с помощью методов структурной или системной адаптации.

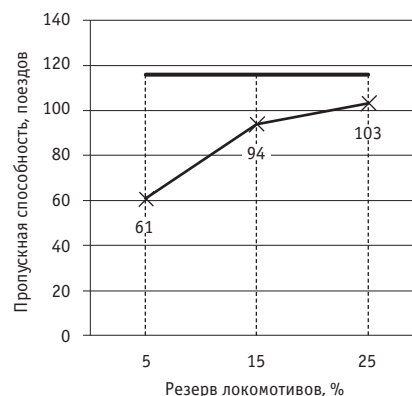
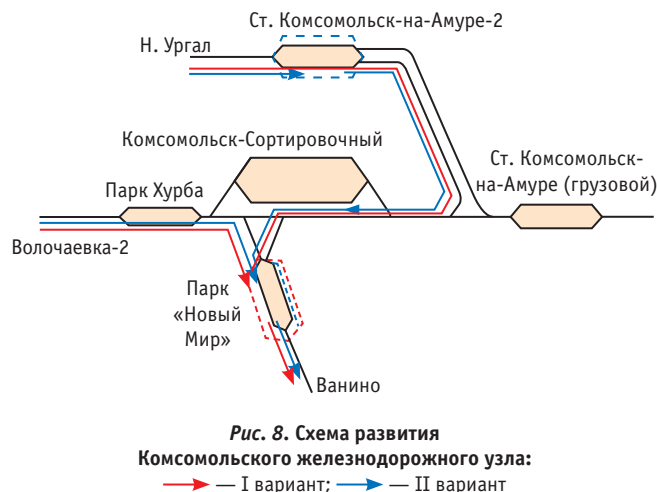


Рис. 7. Диаграмма сопоставления потребной и наличной пропускной способности парка В в 2020 г.:

✕ — 2020 г.; — — потребная пропускная способность, поездов

Таким образом, начиная с 2020 г. организационно-технологические мероприятия параметрической адаптации будут неэффективны, поэтому необходимо переходить к методам структурной или системной адаптации, т.е. к переустройству узких мест станции, строительству дополнительного путевого развития с возможной реорганизацией транзитной работы в узле (рис. 8).



Развитие Комсомольского железнодорожного узла рассматривается по двум вариантам (см. рис. 8). В соответствии с первым вариантом весь транзитный поездопоток обслуживается в объединенном транзитном парке, который устраивается на станции Комсомольск-Сортировочный на базе парка «Новый Мир». Потребное путевое развитие на 2030 г. составит 18 прямо-отправочных путей.

По второму варианту предполагается всю транзитную работу Бамовского направления вынести на отдельный пункт Комсомольск-на-Амуре-2 с учетом развития этого пункта на 16 прямо-отправочных путей и организации работы пункта ПТО. Транзитный поездопоток с Транссиба, как и прежде, будет обрабатываться на станции Комсомольск-Сортировочный, при этом ее переустройства не потребуется. То есть сократятся не только эксплуатационные затраты, но и капитальные вложения.

Кроме того, этапное наращивание мощностей Комсомольского узла позволит освоить заявленный перспективный поток к планируемому сроку.

Таким образом, исходя из приведенного примера можно сделать следующий вывод: в условиях роста транзитного поездопотока рациональное использование методов адаптации даст возможность обеспечить стабильную и бесперебойную работу технических станций, своевременное развитие железнодорожной инфраструктуры при минимальных капитальных вложениях в переустройство станций.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.08 № 887-р [Электронный ресурс]. URL: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009 (дата обращения: 12.02.2014).
2. Государственная целевая программа Хабаровского края «Развитие транспортной системы Хабаровского края» / утв. постановлением правительства Хабаровского края от 05.05.12 № 146-пр [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/995151445> (дата обращения: 12.02.2014).
3. Растрин Л. А. Адаптация сложных систем (методы и приложения). Рига : Зинатне, 1981. 375 с.
4. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года / утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 24.01.12 № 14-р [Электронный ресурс]. URL: http://www.vedomosti.ru/cgi-bin/get_document.cgi/vedomosti_20-04-2011.pdf?file=2011/04/20/258850_0035527483 (дата обращения: 12.02.2014).
5. Исследование возможностей развития железнодорожных станций Северного широтного хода Восточного полигона БАМа в связи с планируемым увеличением объемов перевозок / М. В. Нечипорук, Е. И. Гарлицкий, Е. Э. Червотенко, А. Р. Калинина // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2013. № 3.
6. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М. : ОАО «РЖД», 2011. 305 с.
7. Анисимов В. А., Анисимов В. В. Программно-аналитический комплекс «ЭРА». Модуль ППСС. Расчет пропускной и перерабатывающей способности станций. Хабаровск, 2010.

References

1. Strategiya razvitiya zhelezнодорожного транспорта v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.08 № 887-r [Railway Transport Development Strategy of the Russian Federation to 2030 / ratified by Resolution of the Federal Government of 17.06.08 № 887-r]. [Electronic resource]. URL: http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009 (date accessed: 12.02.2014).
2. Gosudarstvennaya tselevaya programma Khabarovskogo kraia «Razvitiye transportnoy sistemy Khabarovskogo kraia» / utv. postanovleniem Pravitelstva Khabarovskogo kraia ot 05.05.12 № 146-pr [State Target Program of Khabarovsk Krai «Development of transport system of Khabarovsk Krai» / ratified by Resolution of the Government of Khabarovsk Krai of 05.05.12 № 146-pr]. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/995151445> (date accessed: 12.02.2014).
3. Rastrigin L. A. Adaptatsiya slozhnykh sistem (metody i prilozheniya) [Adaptation of complex systems (methods and applications)]. Riga : Zinatne, 1981. 375 p.
4. Dolgosrochnaya programma razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda / utv. rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 24.01.12 № 14-r [Long-term program of development of coal industry of Russia for the period up to 2030 / ratified by Resolution of the Federal Government of 24.01.12 № 14-r]. [Electronic resource]. URL: http://www.vedomosti.ru/cgi-bin/get_document.cgi/vedomosti_20-04-2011.pdf?file=2011/04/20/258850_0035527483 (date accessed: 12.02.2014).
5. Issledovanie vozmozhnostey razvitiya zhelezнодорожных stantsiy Severnogo shirotного khoda Vostochnogo poligona BAMA v svyazi s planiruyemym uvelicheniem ob'yemov perevozok [Research of possibilities of development of railway stations of the Northern Latitudinal Route of the East BAM Range in connection with the planned increase in traffic] / M. V. Nechiporuk, E. I. Garlitskiy, E. E. Chervotenko, A. R. Kalinina // Byulleten OUS OAO «RZhD». 2013. № 3.
6. Instruktziya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Guidelines for analysis of available railway capacity]. M. : OAO «RZhD», 2011. 305 p.
7. Anisimov V. A., Anisimov V. V. Programmno-analiticheskiy kompleks «ERA». Modul PPSS. Raschet propusknoy i pererabatyvayushchey sposobnosti stantsiy [Software and analytical complex «ERA». PPSS module. Analysis of traffic and processing capacity of stations]. Khabarovsk, 2010.

УДК 656.073

Анна Александровна Жаркова, старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), Новокузнецк

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ВАГОНАМИ ОПЕРАТОРСКИХ КОМПАНИЙ В РАМКАХ ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ

Anna Alexandrovna Zharkova, Senior Lecturer, Department of Transport Operations Management and Administration, Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk

Efficiency of managing operating companies' cars within a common database

Аннотация

Рост парка вагонов операторских компаний и несогласованность действий субъектов рынка железнодорожных перевозок приводят к значительным простоям подвижного состава на путях и к чрезмерной загрузке инфраструктуры. Поэтому назрела настоятельная необходимость в разработке универсальных принципов управления парком подвижного состава для новых условий.

На основе единой информационной базы (ЕИБ) предложена система управления порожними вагонопотоками, что позволит упорядочить их и рационально распределить вагоны между грузоотправителями.

Ключевые слова: операторские компании, вагонопотоки, подвижной состав, порожний пробег, грузоотправитель.

Summary

Growth of the fleet of cars of operating companies and lack of coordination between railway market entities lead to significant downtime of rolling stock on tracks and to excessive infrastructure workload. Therefore there is an urgent need to develop universal principles of management rolling stock fleet with account to the new context.

A system to manage empty car traffic is proposed on the basis of a common database (CDB), that will streamline them and distribute the cars between shippers in an efficient way.

Keywords: operating companies, car traffic, rolling stock, empty run, shipper.

На завершающем этапе реализации программы реформирования отрасли выясняется, что железные дороги несут большие потери, поскольку наличие значительного числа владельцев вагонов, низкая концентрация рынка, несовершенство принципов управления небольшими парками, фрагментация парка грузовых вагонов ухудшают показатели эффективности использования подвижного состава в целом и увеличивают нагрузку на инфраструктуру железнодорожного транспорта. С позиции сторонников плановой экономики справедливы замечания по поводу того, что приватный подвижной состав занимает станционные пути, лишая железнодорожную сеть маневренности.

В существующем виде система управления вагонопотоками сформировалась в конце 1950-х гг. в условиях плановой экономики, когда был единый собственник вагонов, распоряжавшийся ими как единым обезличенным парком. Доля вагонов у предприятий была незначительна и не оказывала серьезного влияния на передвижение парка МПС.

Основной задачей этой системы было эффективное использование инфраструктуры и подвижного состава. Под эффективным использованием вагона понимается прежде всего набор традиционных эксплуатационных показателей, не имеющих прямой связи с доходностью вагона в единицу времени (хотя косвенно, разумеется, эти показатели связаны с экономикой).

Для оператора важнейшим критерием оптимизации является доходность вагона в единицу времени, невзирая на загрузенность станций, возрастающий объем маневровой работы и рост встречных вагонопотоков на сети [1].

Таким образом, эффективное использование подвижного состава во времени и в пространстве отодвигается для собственника на второй план. Первоочередной задачей становится поиск, а нередко и сознательное ожидание доходной перевозки в ущерб общесетевому перевозочному процессу [2].

К основным проблемам существующей модели взаимодействия субъектов железнодорожных перевозок можно отнести:

неравенство экономических и технологических условий при перевозках в парке грузовых вагонов, принадлежащих перевозчику, и в собственных/арендованных вагонах;

неэффективность и необъективность тарифов на перевозки в собственных поездных формированиях;

недостаточное законодательное регулирование деятельности операторов подвижного состава, их взаимодействия с грузовладельцами, перевозчиками и собственниками инфраструктуры;

недостаточный уровень контроля за состоянием собственного/арендованного подвижного состава, условиями его эксплуатации и ремонта, отсутствие нормативной системы ответственности владельцев подвижного состава за последствия транспортных инцидентов по причинам несоответствия подвижного состава стандартам и регламентам;

недостаточную степень нормативного регулирования функционирования железнодорожного транспорта необщего пользования [3, 4].

В настоящее время назрела необходимость в коренном пересмотре принципов управления вагонопотоками, в первую очередь — порожними [1].

Для обеспечения эффективного управления вагонопотоками должен быть отлажен механизм оперативного взаимодействия операторских компаний, ОАО «РЖД» и промышленных предприятий на основе единой информационной системы и выработан оптимальный порядок досудебного разрешения конфликтных ситуаций, без чего невозможна эффективная работа всей системы в целом.

Поэтому для увеличения обмена взаимной информацией предлагается создать единую информационную базу (ЕИБ) с целью соблюдения интересов как промышленных предприятий, так и операторских компаний.

В системе ЕИБ предполагается управление порожними вагонопотоками. Для этого операторские компании должны предоставить в ЕИБ в управление свой подвижной состав. При этом предусматривается, что плата за пользование вагонами будет взыскиваться с промпредприятий в пользу операторов, как и прежде.

ЕИБ предназначена для осуществления функций управления вагонопотоками на основе принципов логистики, что позволит упорядочить вагонопотоки в промузле и рационально распределить порожние вагоны между грузоотправителями.

ЕИБ, анализируя данные о состоянии вагонов, их местоположении, примерном времени окончания операций погрузки/выгрузки, ремонта и доставки вагонов, сможет определять оптимальные маршруты следования, что позволит минимизировать порожний пробег и максимально эффективно использовать подвижной состав.

Кроме того, управляя вагонами операторских компаний и имея данные о востребованности порожних вагонов, ЕИБ сможет вовремя и без задержки выводить освободившиеся вагоны из-под выгрузки с путей грузополучателя, что решит проблему перегруженности путей промпредприятий порожними вагонами из-за отсутствия заказов у операторов.

Цели ЕИБ:

упорядочение вагонопотоков в промузле и промрайоне; рациональное распределение порожних вагонов между грузоотправителями;

минимизация порожнего пробега;

максимально эффективное использование подвижного состава.

Таким образом, перед ЕИБ стоят следующие задачи:

обеспечение порожними вагонами грузоотправителей;

обеспечение своевременного вывода порожнего подвижного состава с путей промпредприятий;

информирование грузоотправителей о наличии порожнего подвижного состава или о ближайшем времени его высвобождения;

подбор подвижного состава по запросу грузоотправителя, информирование операторов о состоянии их вагонов;

информирование о времени проведения погрузочно-разгрузочных работ;

аккумулирование и систематизация сведений о наличном порожнем подвижном составе.

Поставленные задачи можно решить за счет создания электронной базы данных, куда будут стекаться сведения о вагонах, участвующих в перевозках в рамках конкретного полигона.

Площадкой для размещения ЕИБ может стать региональная индустриально-транспортная компания (ИТК), которая будет контролировать работу производственных предприятий и транспорта в области безопасности движения, решать вопросы перспективного развития перевозочного процесса, привлекая финансы банков и коммерческих структур.

ИТК совместно с ОАО «РЖД» позволит организовать всю работу транспорта на региональном уровне, установить местные тарифы, контролировать безопасность движения и технику безопасности.

В число функций такой компании должны входить:

сбор информации о порожних вагонах операторских компаний;

прием заявок от грузоотправителей;

обработка заявок от грузоотправителей;

распределение порожняка по заявкам;

сбор и ремонт поврежденного подвижного состава.

ИТК целесообразно сформировать на базе инфраструктуры ОАО «РЖД». Кроме того, следует создать логистический центр, который будет принимать и обрабатывать заявки от грузоотправителей и другую информацию, поступающую в ЕИБ.

Идея объединения парков операторских компаний в рамках ЕИБ имеет ряд преимуществ.

Во-первых, операторские компании не будут обременены никакими обязательствами, кроме предоставления своих вагонов на условиях аренды, устанавливая за них плату. Таким образом, малые операторы не только не уйдут с рынка, но и по-прежнему станут оказывать стабилизирующее воздействие на цены. ЕИБ будет выступать как электронная биржа вагонов, через которую операторы будут предоставлять свои услуги.

Во-вторых, грузоотправитель сможет выбирать вагоны той операторской компании, с которой ему выгоднее работать, что, в свою очередь, повысит конкуренцию среди операторов.

В-третьих, структура управления всей системой должна максимально снизить непроизводительные простои вагонов, минимизировать порожние пробеги, упорядочить вагонопотоки, что в условиях недостаточности инфраструктуры весьма актуально. ИТК, будучи лишь системой регулирования ва-

гонопотоков на основе ЕИБ, не станет диктовать условия для операторов. Операторская компания сама будет вправе выбирать, работать ли ей в рамках ЕИБ либо самостоятельно, а также устанавливать плату за пользование собственными вагонами.

В-четвертых, отсутствие членских взносов при вхождении в ИТК и других юридических препятствий позволит новым операторским компаниям свободно выходить на рынок грузовых перевозок.

Литература

1. Хусаинов Ф. И. Экономические проблемы управления вагонным парком // Экономика железных дорог. 2010. № 11. С. 63–77.
2. Гурьев А. И. Интервью Вадима Морозова: Возможности ОАО «РЖД» вести свой бизнес должны быть гораздо более гибкими, чем сегодня // РЖД-Партнер. 2008. № 20. С. 6–10.
3. Перевозки грузов промышленных предприятий в вагонах операторских компаний / А. М. Островский, М. Г. Дружинина, А. А. Жаркова, Д. Ю. Жарков // Железнодорожный транспорт. 2013. № 3. С. 76–77. ISSN 0044-4448.
4. Островский А. М., Жаркова А. А. Специфика и проблемы перевозки грузов промышленных предприятий в вагонах операторских компаний // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 2 (4). С. 24–27.

References

1. Khusainov F. I. Ekonomicheskie problemy upravleniya vagonnym parkom [Economic issues of car fleet management] // Ekonomika zheleznnykh dorog. 2010. № 11. P. 63–77.
2. Guryev A. I. Intervyu Vadima Morozova: Vozmozhnosti OAO «RZhD» vesti svoi biznes dolzhny byt gorazdo bolee gibkimi, chem segodnya [Opportunities of JSC Russian Railways to manage its business should be much more flexible than they are today] // RZhD-Partner. 2008. № 20. P. 6–10.
3. Perevozki грузов promyshlennykh predpriyatiy v vagonakh operatorskikh kompaniy [Transportation of cargo of industrial companies using cars of operating companies] / A. M. Ostrovskiy, M. G. Druzhinina, A. A. Zharkova, D. Yu. Zharkov // Zheleznodorozhnyy transport. 2013. № 3. P. 76–77. ISSN 0044-4448.
4. Ostrovskiy A. M., Zharkova A. A. Spetsifika i problemy perevozki грузов promyshlennykh predpriyatiy v vagonakh operatorskikh kompaniy [Specifics and issues of transportation of cargo of industrial companies using cars of operating companies] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta. 2013. № 2 (4). P. 24–27.

УДК 629.014.7

**Александр Борисович Левин, генеральный директор
ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения», Нижний Тагил,
Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург**

ОЦЕНКА ДЕМПИРУЮЩИХ СВОЙСТВ БУКОВОГО ПОДВЕШИВАНИЯ МНОГООСНЫХ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Alexander Borisovich Levin, General Director of LLC Uralskoye Konstruktorskoye Buro Vagonostroeniya, Nizhny Tagil,
Alexander Eduardovich Pavlyukov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Alexander Vasilievich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg**

Evaluation of damping properties of axle-box suspension in multiaxial freight car bogies

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы проектирования многоосных тележек для инновационного подвижного состава. Предложены и проанализированы математические модели фрикционных гасителей, совмещенных с упругими элементами — цилиндрическими винтовыми пружинами.

Полученные результаты позволяют создать имитационную модель движения вагона на проектируемой многоосной тележке для уточненного динамического моделирования и вычислительных экспериментов и, таким образом, выбрать рациональные параметры тележки.

Ключевые слова: инновационный вагон, многоосная тележка, буксовое подвешивание, гаситель колебаний, расчет, силовая характеристика.

Summary

The article addresses the issues of design of multiaxial bogies for innovative rolling stock. The mathematical models of friction dampers, combined with elastic elements — coil springs have been proposed and analyzed.

The obtained results allow to create a simulation model of the motion of car on the designed multiaxial bogie for improved dynamic modeling and computational experiments and thus to choose the efficient parameters of the bogie.

Keywords: innovative car, multiaxial bogie, axle-box suspension, dampener, analysis, force characteristic.

В работах [1, 2] отмечалось, что одним из двух возможных путей повышения провозной способности магистральных линий (в первую очередь — на основных грузообразующих направлениях) является внедрение большегрузных (инновационных) вагонов, позволяющих значительно увеличить вес поезда в рамках существующей инфраструктуры.

Что сегодня включает понятие «инновационный вагон»? С точки зрения собственников грузовых вагонов, это повышение производительности вагона за счет большей грузоподъемности (увеличение числа осей при ограничении роста осевой нагрузки, увеличение осевой нагрузки и в обоих случаях — снижение тары вагона), увеличение межремонтного пробега (450–500 тыс. км до первого деповского ремонта) и срока службы износостойких элементов (до 1 млн км), т.е. снижение затрат жизненного цикла. Кроме того, конструкция должна обеспечивать сокращение времени пребывания вагона под погрузочно-разгрузочными операциями и ускорять его оборот.

Для владельца инфраструктуры важно соблюдать требование безопасности движения вагонов и не допускать увеличения динамического воздействия на верхнее строение пути. В частности, тележка инновационного вагона должна обеспечивать осевую нагрузку 25–27 тс/ось без увеличения воздействия на путь и его элементы, а конструкции многоосных тележек, реализующие осевую нагрузку 23,5–25 тс/ось, должны обладать пониженным динамическим воздействием на путь за счет оптимального проектирования рессорного подвешивания и введения новых узлов. Это позволяет повысить скорость движения в порожнем состоянии, а значит, и пропускную способность инфраструктуры железной дороги [3].

Следует заметить, что основные характеристики инновационного грузового вагона определяются конструктивным исполнением тележки и ее параметрами. Из всего многообразия сложных проблем, возникающих при создании инновационной тележки грузового вагона, в данной статье рассматриваются вопросы, связанные с проектированием гасителя колебаний. Наиболее вероятным конструктивным исполнением рессорного подвешивания разрабатываемой тележки следует признать буксовое, поскольку оно отвечает таким двум важнейшим требованиям, как значительное снижение веса необрессоренных частей тележки и уменьшение динамического воздействия вагона на путь [4]. Для сравнения: вес обрессоренных частей для таких тележек-прототипов, как УВЗ-9м, имеющей центральное расположение рессорных комплектов, и УВЗ-10м, составляет соответственно 24,8 и 36,7 % (рис. 1).

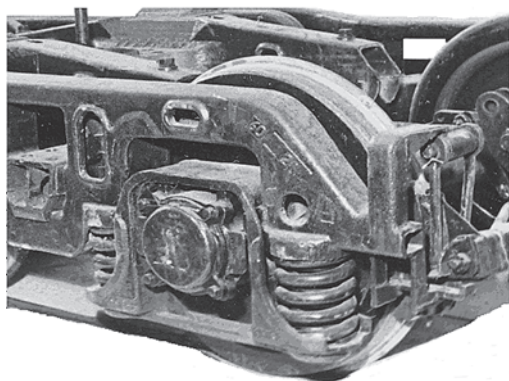


Рис. 1. Вид буксового рессорного подвешивания тележки грузового вагона

С другой стороны, вес рессорных комплектов, приходящихся на одну колесную пару, в тележке мод. 18-100 равен 210 кг, в тележке УВЗ-9м — 167 кг, а в тележке с буксовым подвешиванием (двух- или трехосной) — 360 кг (вес одного рессорного комплекта с гасителем колебания — 50 кг, вес балансира — 80 кг).

Анализ конструкций отечественных и зарубежных тележек грузовых вагонов с буксовым подвешиванием показывает, что широкое применение получили фрикционные гасители, совмещенные с упругими элементами — цилиндрическими винтовыми пружинами, ввиду их компактности. Гасители с постоянным трением используются реже, более распространены гасители с переменной силой трения, называемой иногда «пропорциональной» (рис. 2).

Пропорциональное трение в рессорном комплекте принято определять через коэффициент относительного трения ϕ , который представляет собой отношение сил трения, препятствующих колебаниям рессорного комплекта (ΣF), к восстанавливающей силе рессорного комплекта ($P_{\text{рк}}$), т.е. $\phi = \Sigma F / P_{\text{рк}}$. Коэффициент ϕ определяется при сжатии (нисходящее движение) и выпрямлении (восходящее движение) рессорного комплекта. Средний коэффициент относительного трения рессорного комплекта представляет собой среднее арифметическое коэффициентов при сжатии и выпрямлении [5–7].

Фрикционный гаситель колебаний создает силы трения, пропорциональные прогибу рессорного подвешивания (рис. 3). Нагрузка от надрессорной балки через боковые рамы тележки, рессорное подвешивание и нажимной конус 1 передается на два раздвигающихся клина 2. При деформациях рессорного подвешивания под действием скошенных поверхностей нажимного конуса раздвижные цилиндрические клинья прижи-

| Гасители постоянного трения | | Гасители переменного трения | |
|---------------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| с равносоставной силой трения | с разносторонней силой трения | с равносоставной силой трения | с разносторонней силой трения |
| Характеристика сил трения | | | |
| $F_H = F_B$ | $F_B \neq F_H$ | $F_H = F_B$ | $F_B \neq F_H$ |
| Общая силовая характеристика гасителя | | | |
| | | | |
| $Q_{\phi} = F_{H,B} \pm c \cdot z$ | $Q_{\phi} = F_{0,B} \pm c \cdot z$ $Q_{\phi} = F_{0,H} \pm c \cdot z$ | $Q_{\phi} = F_0 \pm \phi c \cdot z$ | $Q_{\phi} = \begin{cases} F_{0,B} \pm \phi_B c \cdot z \\ F_{0,H} \pm \phi_H c \cdot z \end{cases}$ |
| | | | |

Рис. 2. Фрикционные гасители колебаний, совмещенные с упругим элементом

маются к внутренней поверхности фрикционного стакана 4. Между трущимися поверхностями раздвижных клиньев и стакана при их взаимном перемещении возникают силы трения, пропорциональные прогибу пружины 5, размещенной между фланцем стакана и опорным кольцом 3. Возникающие силы трения превращают энергию колебания кузова в тепловую, вследствие чего колебания кузова уменьшаются либо совсем затухают. При снижении нагрузки или полном ее снятии клинья перемещаются вверх под действием сил упругости пружины. Фрикционный гаситель гасит вертикальные колебания кузова вагона, а горизонтальные колебания гасятся за счет горизонтальной упругости рессорного подвешивания.

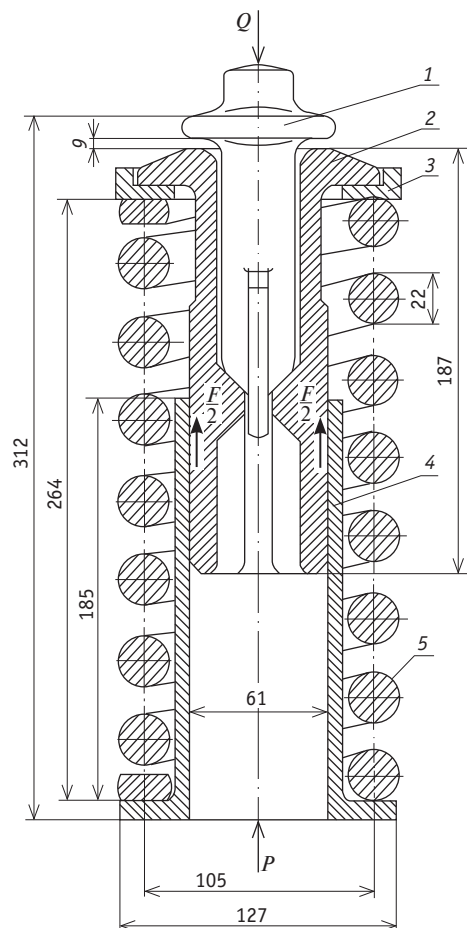


Рис. 3. Вариант конструктивного исполнения фрикционного гасителя колебаний

Исходя из этого можно записать следующие условия:

при $Q > P + F_H$ — движение вниз;

при $Q < P - F_B$ — движение вверх;

при $Q = P \pm F_{H/B}$ — движение отсутствует.

В работе рассматриваются три варианта исполнения главных поверхностей трения. Первый вариант: угол наклона β выбран таким образом, что внутренний диаметр фрикционного стакана в верхней части меньше, чем в нижней (конусность вверх, рис. 4). Второй вариант: угол наклона β выбран таким обра-

зом, что внутренний диаметр фрикционного стакана в нижней части меньше, чем в верхней (конусность вниз, рис. 5). Третий промежуточный вариант: $\beta = 0$, поверхность цилиндрическая.

Первый вариант. На рис. 4а показана схема сил, действующих на клин при нисходящем движении. В данный момент времени клин находится в состоянии равновесия под действием сил S , S_1 и P . Силы S_i отклонены от нормального направления в результате действия сил трения на поверхностях трения, т.е. отклонены на величину угла трения ρ . Взаимосвязь между углом трения ρ и коэффициентом трения μ выражается условием $\mu = \operatorname{tg} \rho$.

Векторы сил S_i вычисляются как $\vec{S} = \vec{N} + \mu \vec{N}$ и $\vec{S}_1 = \vec{N}_1 + \mu \vec{N}_1$.

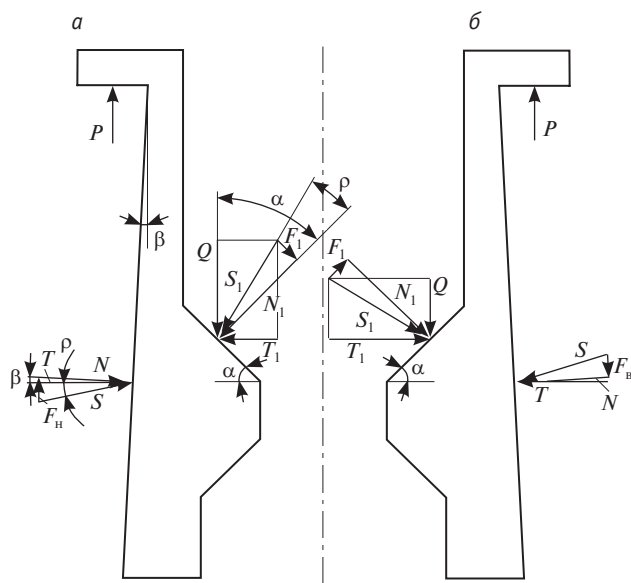


Рис. 4. Схемы сил, действующих на клинья, по первому варианту: а — равновесие клина при нисходящем, б — при восходящем движении

Для анализа равновесия клина разложим силы S_i на вертикальные и горизонтальные. На основании равновесия клина можно составить следующую систему уравнений:

$$T - T_1 = 0; \quad (1)$$

$$P + F_H - Q = 0. \quad (2)$$

Из треугольников сил имеем:

$$T = \frac{F_H}{\operatorname{tg}(\rho - \beta)};$$

$$T_1 = Q \operatorname{tg}(\alpha - \rho).$$

Полученные выражения подставим в (1):

$$\frac{F_H}{\operatorname{tg}(\rho - \beta)} - Q \operatorname{tg}(\alpha - \rho) = 0. \quad (3)$$

Из (2) найдем $Q = P + F_H$ и подставим в (3):

$$\frac{F_H}{\operatorname{tg}(\rho - \beta)} - F_H \operatorname{tg}(\alpha - \rho) = P \operatorname{tg}(\alpha - \rho). \quad (4)$$

Из (4) выразим значение силы трения при нисходящем движении:

$$F_H = \frac{P \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}.$$

Обозначим

$$k_{1H} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)},$$

получим

$$F_H = k_{1H} P, \quad (5)$$

где k_{1H} — коэффициент передачи гасителя колебаний при нисходящем движении.

Аналогичным образом рассмотрим движение клина вверх (см. рис. 4б):

$$T - T_1 = 0;$$

$$F_B - P + Q = 0.$$

Из треугольников сил имеем:

$$T = \frac{F_B}{\operatorname{tg}(\rho + \beta)};$$

$$T_1 = Q \operatorname{tg}(\alpha + \rho).$$

После подстановки и преобразований получим

$$F_B = \frac{P \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}{1 + \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}.$$

Обозначим

$$k_{1B} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}{1 + \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)},$$

получим

$$F_B = k_{1B} P, \quad (6)$$

где k_{1B} — коэффициент передачи гасителя колебаний при восходящем движении.

Второй вариант. На рис. 5 показаны схемы сил, действующих на клин при нисходящем и восходящем движениях.

Записав условия равновесия и выполнив аналогичные преобразования, получим при нисходящем движении

$$F_H = \frac{P \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}.$$

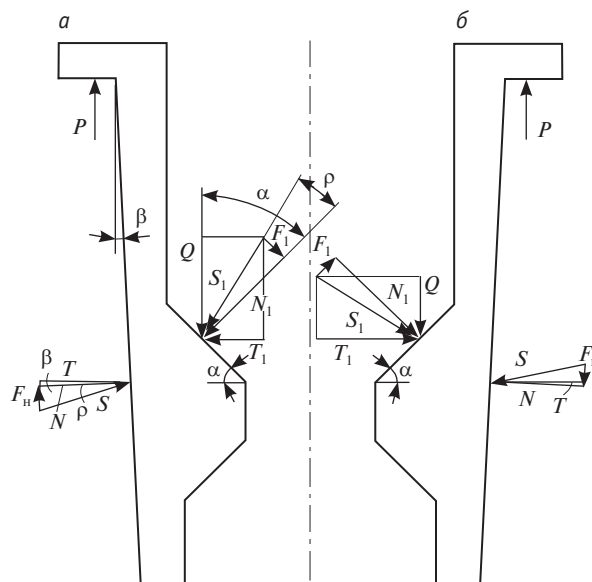


Рис. 5. Схемы сил, действующих на клинья, по второму варианту:

а — равновесие клина при нисходящем, б — при восходящем движении

Обозначим

$$k_{2H} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \operatorname{tg}(\rho + \beta)},$$

получим

$$F_H = k_{2H} P. \quad (7)$$

Для восходящего движения:

$$F_B = \frac{P \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}{1 + \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}.$$

Обозначим

$$k_{2B} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)}{1 + \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\rho - \beta)},$$

получим

$$F_B = k_{2B} P. \quad (8)$$

Силы трения, возникающие в системе, зависят от углов наклона поверхностей α и β и угла трения ρ (коэффициента трения). Рассмотрим влияние этих параметров на развиваемые гасителем колебаний силы трения [см. формулы (5)–(8)].

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента передачи гасителя колебаний от угла наклона клиньев α при нисходящем и восходящем движении, характерные для обоих вариантов конструктивного исполнения. Как следует из графиков рис. 6, чем больше угол α , тем больше силы трения, создаваемые гасителем колебания, а следовательно, и гашение колебаний. Графики построены для угла трения $\rho = 14^\circ$ ($\operatorname{tg} \rho = 0,25$ — величина коэффициента трения на рабочей поверхности клина) и $\beta = 0^\circ$.

Следует отметить, что в практике отечественного вагоностроения применялись гасители колебаний с углом наклона клиньев 45° и 50° .

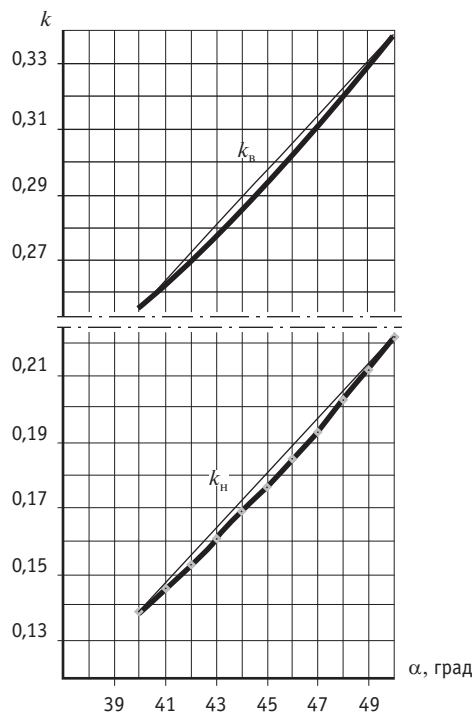


Рис. 6. Зависимости коэффициента передачи гасителя колебаний от угла наклона клиньев: k_n — нисходящее, k_v — восходящее движение

Для оценки влияния других параметров на свойства гасителей построены графики зависимостей коэффициента передачи гасителя колебаний от угла трения и угла наклона рабочей поверхности (рис. 7).

Кривая $k_p = f(\rho)$ построена при $\alpha = 45^\circ$ и $\beta = 0^\circ$. При уменьшении угла трения снижаются и силы трения, создаваемые гасителем колебаний (коэффициент трения изменялся с 0,25 до 0,1).

Кривые $k_{1n} = f(\beta)$ и $k_{1v} = f(\beta)$, построенные при $\alpha = 45^\circ$ и $\rho = 14^\circ$, характеризуют силы трения, развиваемые гасителем колебания при нисходящем и восходящем движении, по первому варианту. Для этого варианта в случае увеличения угла β при нисходящем движении силы трения снижаются. При восходящем движении они с таким же темпом нарастают.

Аналогичные кривые построены для второго варианта конструктивного исполнения гасителя колебаний. Данная конструкция представляет собой определенный интерес тем, что силами трения относительно просто можно управлять. При некотором угле β силы трения при нисходящем и восходящем движении равны.

Гаситель колебаний, показанный на рис. 3, располагается в пружине, имеющей статический прогиб 0,046 м (46 мм) под действием рабочей нагрузки 1300 кг и 0,085 м (85 мм) — при действии максимальной нагрузки 2400 кг. Жесткость пружины по результатам стендовых испытаний составляет 277,23 кН/м

(28,26 тс/м). Расчетная жесткость при числе витков 7,15 и модуле сдвига (материал — сталь 60С2) $G = 8 \cdot 10^4$ МПа равна 283,02 кН/м. Коэффициент запаса прогиба 1,85, углы $\alpha = 45^\circ$, $\rho = 14^\circ$, $\beta = 0^\circ$.

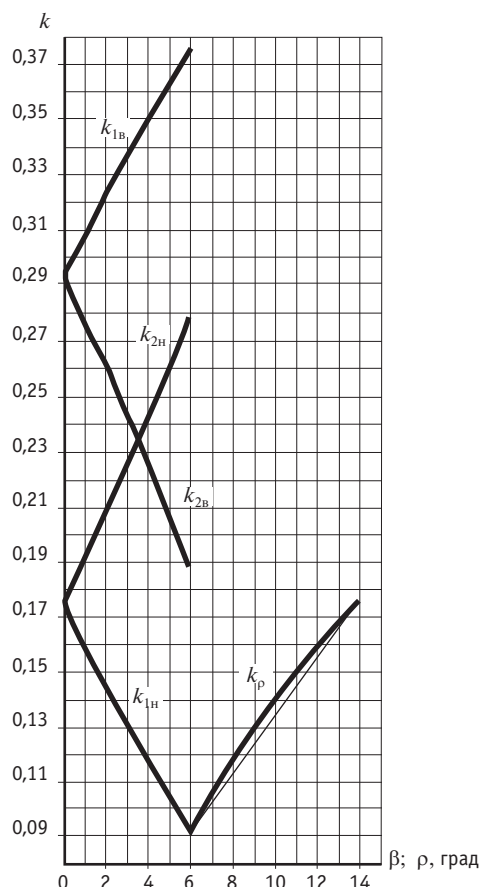


Рис. 7. Зависимости коэффициента передачи гасителя колебаний от угла наклона рабочей поверхности и угла трения

Согласно (5) и (6), имеем $F_n = 229,4$ кг и $F_v = 382$ кг. На рис. 8 построена теоретическая диаграмма работы гасителя (силовая характеристика гасителя колебаний без учета сил трения покоя). Из диаграммы следует, что коэффициент относительного трения гасителя колебаний определяется по зависимости

$$\varphi = \frac{P_n - P_p}{P_n + P_p}.$$

Построенная диаграмма позволяет определить количество поглощенной рассеянной энергии в гасителе колебаний за один цикл колебаний из расчета фактически измеренной амплитуды $\Delta_d = 24$ мм (см. рис. 8) при динамических испытаниях шестiosных вагонов на тележках с буксовым подвешиванием при частоте колебаний 2 Гц и более (до 5 Гц). Это наряду с оценкой перемещения трущихся деталей является основным параметром для прогнозирования износа гасителя колебаний.

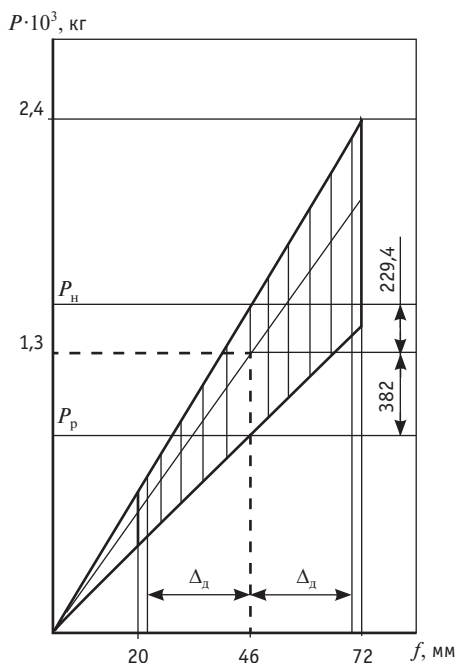


Рис. 8. Силовая характеристика гасителя колебаний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный расчет сил трения в гасителе, совмещенном с упругим элементом, и методика могут быть использованы на начальных стадиях проектирования, когда создается общая компоновка конструкции тележки, с целью упрощенной оценки динамических качеств вагона и выбора необходимой (потребной) величины трения для демпфирования колебаний.

Выполненные расчеты позволили вывести зависимости пропорционального трения гасителя колебаний рассмотренной клиновой конструкции. Полученные параметры будут использованы для разработки математической модели движения тележки (вагона) в программном комплексе «Универсальный механизм» при описании уравнений связей между телами и задании значений коэффициентов в уравнениях. Это позволит создать имитационную модель движения вагона на проектируемой тележке для уточненного динамического моделирования и вычислительных экспериментов и, таким образом, выбрать рациональные параметры тележки.

Литература

1. Лapidус Б. М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 5. С. 3–6.
2. Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава / А. В. Смольянинов, В. Н. Филиппов, И. В. Козлов, А. Н. Давыдов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 46–49. ISSN 1815-9400.
3. Давыдов А. Н., Смольянинов А. В. Боковые опоры вагона и нагрузки, действующие на путь // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 38–40. ISSN 1815-9400.
4. Давыдов А. Н., Смольянинов А. В. Влияние продольных горизонтальных зазоров в боковых опорах непрерывного контакта на величину критической скорости грузового вагона // Вестник УрГУПС. 2013. № 1. С. 43–49. ISSN 2079-0392.
5. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. П. Азовский, Е. В. Александров, В. В. Кобищанов и др. ; под ред. В. Н. Котурanova. М. : Маршрут, 2005. 490 с.
6. Никольский Л. Н., Кеглин Б. Г. Амортизаторы удара подвижного состава. М. : Машиностроение, 1986. 144 с.
7. Селинов В. И. Проектирование подвешивания вагонов : учеб. пособие. Брянск : БГТУ, 1999. 251 с.

References

1. Lapidus B. M. Povyshenie proizvoditelnosti i effektivnosti zheleznodorozhnogo transporta na innovatsionnoy osnove [Increasing productivity and efficiency of rail transport on the basis of innovations] // Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2012. № 5. P. 3–6.
2. Parametry i konstruktivnoe ispolnenie vysokoproizvoditelnogo podvzhnogo sostava [Parameters and designs of high-performance rolling stock] / A. V. Smolyaninov, V. N. Filippov, I. V. Kozlov, A. N. Davydov // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 46–49. ISSN 1815-9400.
3. Davydov A. N., Smolyaninov A. V. Bokovye opory vagona i nagruzki, deystvuyushchie na put [Rail car side bearers and track loads] // Transport of the Urals. 2013. № 4 (39). P. 38–40. ISSN 1815-9400.
4. Davydov A. N., Smolyaninov A. V. Vliyaniye prodolnykh gorizontalnykh zazorov v bokovykh oporakh nepreryvnogo kontakta na velichinu kriticheskoy skorosti gruzovogo vagona [Influence of longitudinal horizontal gaps in continuous contact side bearers on the value of critical speed of freight car] // Herald of USURT. 2013. № 1. P. 43–49. ISSN 2079-0392.
5. Vagony. Osnovy konstruirovaniya i ekspertizy tekhnicheskikh resheniy : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Rail cars. Design and examination principles for engineering solutions : textbook for railway universities] / A. P. Azovskiy, E. V. Aleksandrov, V. V. Kobishchanov i dr. ; pod red. V. N. Koturanova. M. : Marshrut, 2005. 490 p.
6. Nikolskiy L. N., Keglín B. G. Amortizatory udara podvzhnogo sostava [Rolling stock shock absorbers]. M. : Mashinostroenie, 1986. 144 p.
7. Selinov V. I. Proektirovaniye podveshivaniya vagonov : ucheb. posobie [Designing cars suspension : textbook]. Bryansk : BGТУ, 1999. 251 p.

УДК 629.463.122

Андрей Викторович Намятов, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС, Екатеринбург), инженер-конструктор ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения», Нижний Тагил, **Андрей Геннадьевич Охотников**, ведущий инженер ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения», Нижний Тагил, **Василий Федорович Лапшин**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

МОДЕЛЬ ТЕРМОНАГРУЖЕННОСТИ ВАГОНА-ТЕРМОСА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГОРЯЧИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Andrey Viktorovich Namyatov, graduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Design Engineer, LLC Uralskoye Konstruktorskoye Buro Vagonostroeniya, Nizhny Tagil, **Andrey Gennadyevich Okhotnikov**, Chief Engineer, LLC Uralskoye Konstruktorskoye Buro Vagonostroeniya, Nizhny Tagil, **Vasily Fedorovich Lapshin**, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Thermal loading model of an insulated railcar for transportation of hot steel workpieces

Аннотация

На металлургических предприятиях для внутризаводской технологической транспортировки заготовок используется специализированный подвижной состав. Нередко температура таких заготовок превышает 1000°C, и тогда конструкция вагона подвергается воздействию и механических, и тепловых нагрузок. Подобное сочетание нагрузок представляет интерес для изучения процессов, протекающих в конструкции вагона, и для оценки ее прочностных качеств. В связи с этим особого внимания заслуживают вагоны-термосы, которые одновременно используются и как технологическая температурная камера, и как средство транспортировки заготовок. Однако применяемая в конструкциях таких вагонов температурная футеровка и ее параметры определяются исключительно требованиями технологии изготовления заготовок, а влияние температурных нагрузок на конструкцию вагона при этом не учитывается. В статье рассматриваются результаты разработки компьютерной модели для исследования термонагруженности конструкции вагона-термоса при перевозке слабовых заготовок с температурой до 1000°C.

Ключевые слова: вагон-термос, горячая слабовая заготовка, футеровка, метод конечных элементов, теплопроводность, конвекция, граничные условия, термонагруженность, условие прочности, адекватность модели.

Summary

Metallurgical enterprises use special-purpose rolling stock for in-plant transportation of workpieces. Often, the temperature of these workpieces exceeds 1000°C, and then railcar structure is exposed to both mechanical and thermal loads. This combination of loads is of interest from the viewpoint of studying the processes occurring in the car structure, and for evaluating its strength properties. In this connection, special attention should be paid to insulated railcars, which are used both as a thermal process camera, and as a means of transportation of workpieces. However, thermal lining used in such cars and its parameters are determined solely by the requirements of workpiece manufacturing technology, and the effect of thermal loads on the car structure is not taken into account. The article discusses the results of the development of a computer model for thermal load study of an insulated railcar structure when transporting slab blanks with temperatures up to 1000°C.

Keywords: insulated railcar, hot slab blank, lining, finite element method, thermal conductivity, convection, boundary conditions, thermal loading, strength condition, model adequacy.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Вагон-термос (рис. 1) состоит из платформы, на которую укладываются заготовки температурой до 1000°C, и колпак с термоизоляционными элементами из промышленного фетра [1]. По технологии, применяемой на металлургических заводах, после укладки горячих заготовок на платформу устанавливают колпак. Вагоны выкатывают за пределы цеха, где они находятся около 20–24 ч. В результате температура заготовок снижается до 300°C, происходит отпуск металла. Затем заготовки подвергают дальнейшей обработке в соответствии с технологическим маршрутом.



Рис. 1. Вагон-термос для непрерывнолитых заготовок

Чтобы снизить температурное воздействие заготовок на раму платформы и обеспечить технологический эффект, используют подсыпку из шамотного кирпича 150 мм огнеупорностью > 1730°C, основу которого составляют SiO_2 и Al_2O_3 ; емкость для

термоизолирующей подсыпки выполнена из торцевого щита и окантовок. Колпак вагона-термоса футеруют при помощи хромосодержащего фетра МКРФ-100 (ГОСТ 23619-79) с температурой применения до 1150°C. Особенность конструкции таких вагонов — использование в несущих элементах двутавровой балки высотой 600 мм и металлического листа толщиной 20 мм в опорных балках.

Характеристика основных элементов вагона-термоса и исходные данные для расчета термонагруженности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные
для расчета термонагруженности вагона-термоса

| Основные элементы вагона-термоса | Значение |
|--|---------------------|
| Колпак: | |
| масса (без теплоизоляции), кг | 14 715 |
| площадь всех поверхностей, м ² | 236 |
| площадь внутренних поверхностей, м ² | 90,2 |
| Теплоизоляция (фетр МКРФ-100): | |
| масса, кг | 600 |
| толщина, м | 0,05 |
| коэффициент теплопроводности при температуре 600°C, Вт/(м·К) | Не более 0,18 |
| Рама платформы: | |
| масса (без футеровки), кг | 13 634 |
| площадь опор для слябов (6 опор), м ² | 1,86 |
| Футеровка (шамотный кирпич): | |
| масса, кг | 4500 |
| плотность, кг/м ³ | 0,7·10 ³ |
| высота насыпа, м | 0,15 |
| коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,84 + 0,0006t |
| Металлургические заготовки (слябы): | |
| масса, кг | 80 775 |
| начальная температура, °C | До 1000 |

Создание новых конструкций вагонов связано с теоретическим обоснованием прочности их элементов. Основной нормативной базой при проектировании грузовых вагонов, в том числе промышленного транспорта, являются «Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [2]. Для внутризаводского транспорта характерна узкая специализация применения, отсутствие сортировочных горок при эксплуатации, увеличенные осевые нагрузки, низкие скорости движения, соударения при маневрах, экстренное торможение. Такой режим эксплуатации сопровождается относительно редким сочетанием экстремальных нагрузок, что соответствует I расчетному режиму. К основным расчетным силам относятся растягивающие и сжимающие силы взаимодействия между вагонами и локомотивом, силы тяжести собственной конструкции и груза. Очевидно, что подобное сочетание нагрузок характерно только для рамы вагона-термоса. Поэтому, исходя из условий эксплуатации и особенностей конструкции вагона-термоса, прочность рамы и прочность колпака будем оценивать по отдельности.

Для рамы вагона-термоса справедливы соотношения:

$$\Sigma \sigma_1^p = \sigma_{ct} + \sigma_p; \quad (1)$$

$$\Sigma \sigma_1^{сж} = \sigma_{ct} + \sigma_{сж}, \quad (2)$$

где σ_{ct} — напряжения от веса груза и собственного веса, включая футеровку и колпак;

σ_p — напряжения от продольной нагрузки растяжения;

$\sigma_{сж}$ — напряжения от продольной нагрузки сжатия.

Следует отметить, что в элементах рамы вагона-термоса дополнительно возникают температурные напряжения, которые не регламентируются нормами [2]. В этом случае расчет производится на сочетание нагрузок по специальному режиму, характерному для данного типа вагонов, т.е. напряжения от дополнительных нагрузок суммируются с напряжениями от основных сил по расчетному режиму [2]:

$$\Sigma \sigma_2 = \sigma_{ct} + \sigma_t, \quad (3)$$

где σ_t — температурные напряжения.

Для колпака рассчитываются нагрузки от его собственного веса и веса фетровой изоляции при подъеме за захватные приспособления краном, кроме того, учитываются возникающие температурные напряжения.

2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОНАГРУЖЕННОСТИ ВАГОНА-ТЕРМОСА

В разработку теоретических методов исследования термонагруженности узлов вагонов большой вклад внесли Ю. Н. Аксенов, С. Н. Киселев, А. А. Миронов, А. Э. Павлюков, В. Л. Образцов, С. Д. Речкалов, П. А. Тищенко, А. И. Турков и другие ученые. В частности, изучены тепловые процессы в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов [3] и распределение температурных полей в сварных соединениях вагонов для сыпучих металлургических грузов [4], разработана теория бесконтактного теплового контроля буксовых узлов в поездах [5], рассмотрены нестационарные температурные поля в элементах дискового тормоза [6] и др.

Однако тепловые процессы в вагоне-термосе, которые, с одной стороны, должны обеспечивать технологический эффект для металлургического производства (отпуск заготовок), а с другой — оказывают негативное влияние на нагруженность конструкции вагона из-за температурных напряжений, ранее не рассматривались. Таким образом, процесс охлаждения металлургических заготовок и воздействие температурных нагрузок на конструкцию вагона-термоса представляет научный интерес. В связи с этим должны быть решены две задачи:

анализ тепловых потоков в вагоне-термосе и проверка технологического эффекта отпуска заготовок для обоснованного назначения параметров теплоизоляционных материалов, что в конечном счете определяет конструкцию вагона-термоса при проектировании (в данной работе не рассматривается); оценка термонагруженности рамы и колпака вагона-термоса. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Отметим, что методологическая основа наших исследований ориентирована на метод конечных элементов, поэтому задача решается с использованием программного продукта ANSYS Workbench 14.5.7.

Объемная расчетная модель вагона-термоса и условия взаимодействия между элементами конструкции колпака, рамы и горячих металлургических заготовок в виде слэбов представлены на рис. 2 и 3. При разработке расчетной модели приняты следующие допущения:

в местах приварки элементов конструкции рамы и колпака вагона-термоса применяется контакт типа «линия — плоскость» без возможности раскрытия и относительного смещения (жестко узел к узлу);

на сопряженных поверхностях труб колпака и кронштейнов рамы (позиция 1 на рис. 3, в 16 местах), а также опорных балок и коробочек рамы (позиция 2 на рис. 3, в 30 местах) и слэбов (позиция 3 на рис. 3, в 30 местах) используется фрикционный контакт типа «плоскость — плоскость»;

болтовые соединения между трубами колпака (позиция 4 на рис. 3, в 4 местах), соединения между опорными балками с ограничителями рамы (позиция 5 на рис. 3, в 48 местах), а также соединения между листами обшивки и балками колпака (позиция 6 на рис. 3, в 144 местах) заменяются шарнирными закреплениями с ограничением всех степеней свободы и возможностью относительной деформации, обусловленной температурной составляющей и позволяющей конструкции дышать.

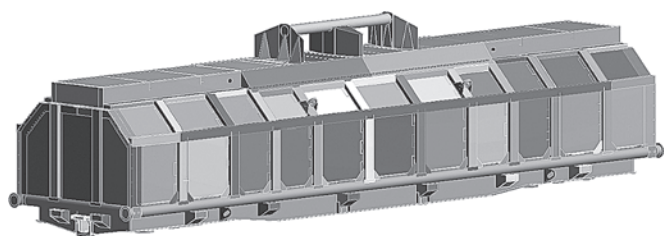


Рис. 2. Объемная твердотельная модель вагона-термоса

Для решения контактной задачи нами принята модель кулоновского трения. В модели две контактирующие поверхности могут переносить некоторую величину сдвигового напряжения по поверхностям раздела до начала их скольжения относительно друг друга (прилипание). В общем случае модель кулоновского трения задает эквивалентное сдвиговое напряжение τ , при котором скольжение на поверхности становится частью давления контакта P :

$$\tau = \mu P + b, \quad (4)$$

где μ — коэффициент трения;

b — сопротивление скольжению (сцепление).

После превышения сдвиговым напряжением некоторого значения τ_{\max} две поверхности будут скользить относительно друг друга. В расчетной модели учитывали только скольжение в контакте и отсутствие сдвиговых напряжений, значение которых при оценке НДС всей конструкции невелико.

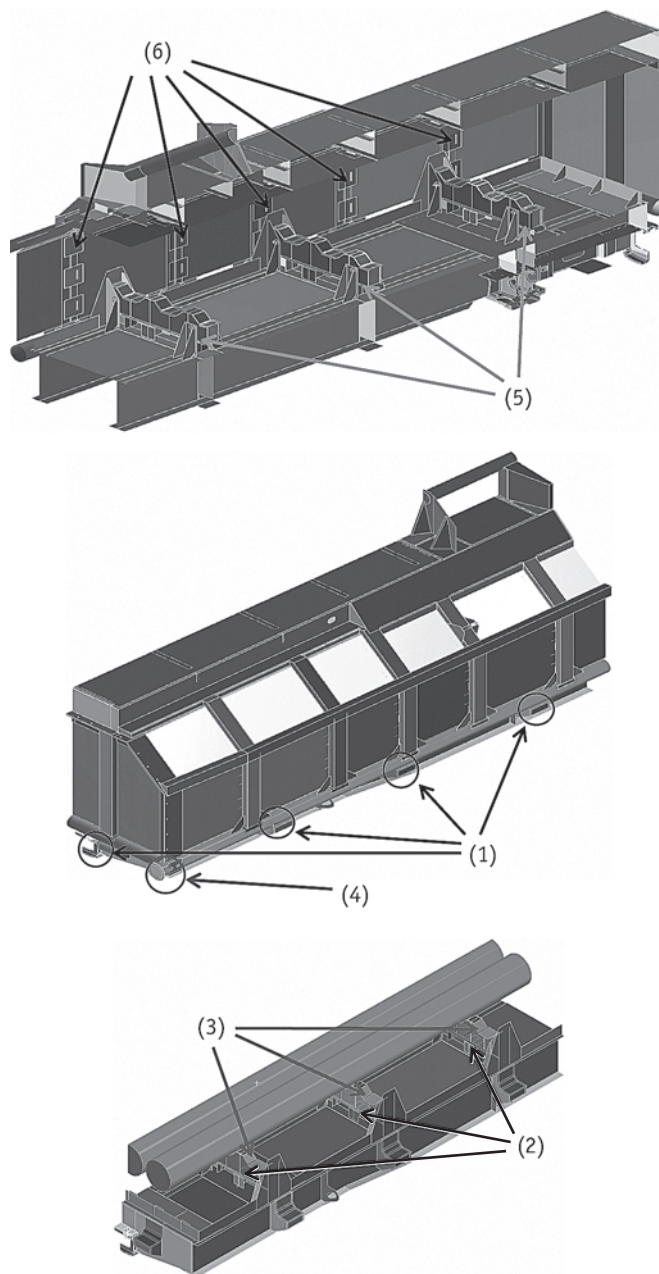


Рис. 3. Условия взаимодействия элементов конструкции:

1, 2, 3 — фрикционный контакт типа «плоскость — плоскость»;
4, 5, 6 — шарнирное закрепление с ограничением всех степеней свободы и возможностью относительной деформации, обусловленной температурной составляющей

Для количественной оценки температурных напряжений необходимо рассмотреть теплотехническую проблему охлаждения заготовок в вагоне-термосе. Следует отметить, что аналогичная задача поставлена в работе [7]. Но в ней рассматривается охлаждение заготовок в теплоизолированных коробах, поэтому исследуются тепловые потоки через ограждения короба. Что же касается вагона-термоса, то в нем потери тепла происходят не только через ограждения колпака, но и через

ограждения рамы с термоизолирующей подсыпкой. Поэтому в данном случае необходимо оценить напряжения в элементах рамы.

Согласно [7, 8], в силу малой скорости охлаждения внутри вагона-термоса устанавливается стационарный режим теплообмена. Теплообмен между поверхностью объекта и окружающей средой (футеровкой, теплоизоляцией и воздухом) обусловлен конвекцией, следовательно, передача тепла между поверхностью заготовки и окружающей средой определяется в соответствии с законом Ньютона [9].

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ВАГОНА-ТЕРМОСА

Уравнение теплопроводности для анализа стационарного теплового состояния [9], приведенное к методу конечных элементов, имеет следующий вид [10, 11]:

$$[K]\{T\} = \{Q\}, \quad (5)$$

где $[K]$ — матрица теплопроводности;

$\{T\}$ — вектор узловых температур;

$\{Q\}$ — вектор узловых тепловых потоков.

При этом матрица $[K]$ в общем случае описывает не только условия теплопроводности, но и конвекцию, а тепловой поток $\{Q\}$ включает не только заданный тепловой поток, но и составляющую конвекции.

При определении температурных напряжений мы исходили из физической сущности их возникновения. Напомним, что температурные напряжения возникают в теле из-за неравномерного распределения температуры в различных его частях и из-за ограничения возможности теплового расширения (или сжатия) со стороны окружающих частей тела или со стороны других тел, окружающих его.

Расчетная конечно-элементная модель вагона-термоса представляет собой пространственную объемно-пластинчатую схему. Для моделирования листовых и гнутых профилей колпака и рамы использован элемент SHELL 181 с шестью степенями свободы в каждом, который позволяет предварительно задать нужную толщину пластинчатого элемента конструкции. Литые детали (пятники, надпятниковые коробки, передние и задние упоры) аппроксимировались объемными конечными элементами SOLID 187 с тремя степенями свободы в каждом узле. Описание контактных поверхностей в зоне сварных швов выполнялось конечными элементами CONTA 174 и TARGE 170 соответственно для контактной и ответной поверхности. Контакты трения аппроксимировались элементами CONTA 175 и TARGE 170. При выборе целевой и контактной поверхностей руководствовались следующим правилом: за целевую принимается менее выпуклая или плоская поверхность.

Конечно-элементная модель вагона-термоса представлена на рис. 4, где для большей наглядности рама (197 734 элемента и 352 211 узлов), груз (214 581 элемент и 380 980 узлов) и колпак (176 940 элементов и 336 122 узла) показаны по отдельности.

Поверхностные нагрузки, обусловленные конвективной теплопередачей, заданы через коэффициенты теплопередачи на следующих поверхностях:

$h_f = 6,2 \cdot 10^{-7}$ Вт/мм²·град — для футеровки (шамотный кирпич) на листы пола рамы, а также прилегающие вертикальные элементы на высоте 150 мм;

$h_t = 1,5 \cdot 10^{-7}$ Вт/мм²·град — для теплоизоляции (фетр МКРФ-100) на листы торцевых и боковых стенок;

$h_a = 5,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/мм²·град — для воздуха на остальные поверхности (кроме контактных) расчетной модели вагона-термоса.

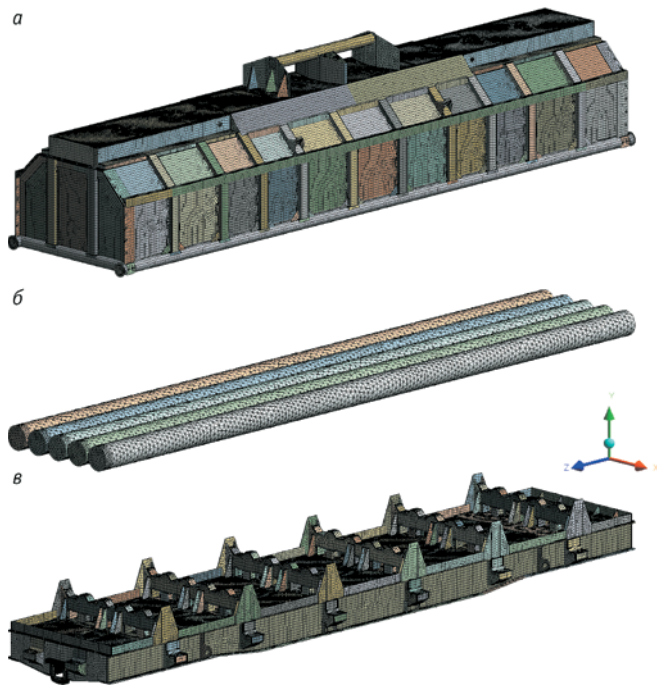


Рис. 4. Конечно-элементная модель колпака (а), груза (б) и рамы (в) вагона-термоса

Коэффициент теплопроводности для элементов конструкции рамы и колпака вагона-термоса принят как средняя величина для материала конструкционной стали, $k_s = 6,05 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм·град.

Схема приложения нагрузок и граничных условий представлена на рис. 5.

Для оценки прочности конструкции рамы и колпака использован традиционный подход, основанный на сравнении с допускаемыми напряжениями. В качестве расчетных напряжений приняты эквивалентные напряжения по Мизесу для объемно-напряженного состояния:

$$\sigma_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (6)$$

Процедура расчета напряжений выполняется в два этапа: на первом этапе рассчитываются температурные поля и соответствующие температурные деформации;

на втором этапе прикладываются вертикальные нагрузки и рассчитываются механические напряжения от собственного веса элементов вагона (рамы и колпака) и веса металлургических заготовок.

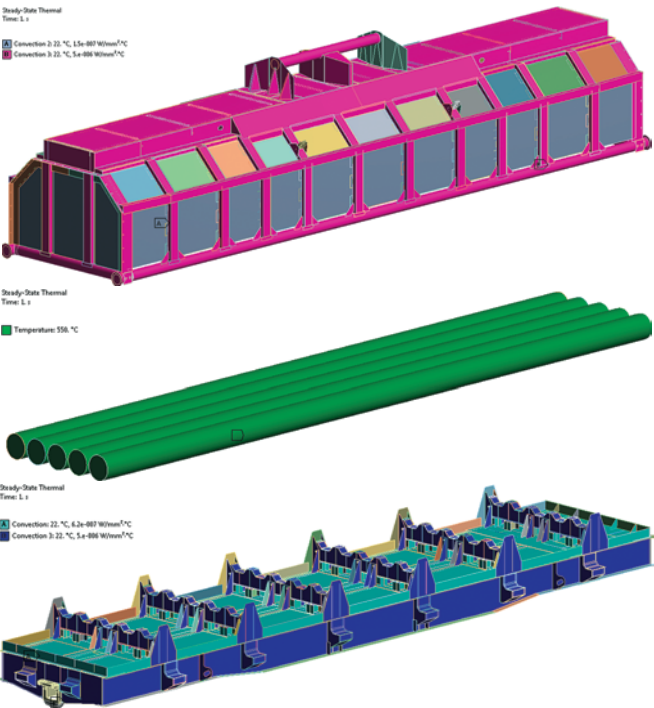


Рис. 5. Схема приложения нагрузок и граничных условий

4. ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Для оценки достоверности модели выполнен расчет температурных полей в элементах конструкции вагона-термоса при следующих начальных условиях: температура металлургических заготовок 550°С, температура наружного воздуха 22°С. На рис. 6 в качестве примера показан фрагмент распределения температурных полей в раме вагона-термоса. Экспериментальные значения температур получены в октябре 2012 г. на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате при осмотре вагонов-термосов модели 23-5165. Измерение температуры поверхностей выполнено через 24–26 ч после установки слэбов с регистрацией пирометром «Термоскоп-100». Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Относительно большие расхождения в значениях температур по отдельным элементам вагона-термоса объясняются многообразием влияющих факторов. Например:

в реальном вагоне поверхности опорных балок колпака имеют начальные прогибы, в то время как в расчетах принят идеальный контакт между опорными поверхностями колпака и рамы;

толщина шамотной подсыпки и футеровки может отличаться от расчетных значений из-за ее изменения в процессе эксплуатации;

характер крепления обшивки и расположения сварных швов может не совпадать с шагом конечно-элементной сетки.

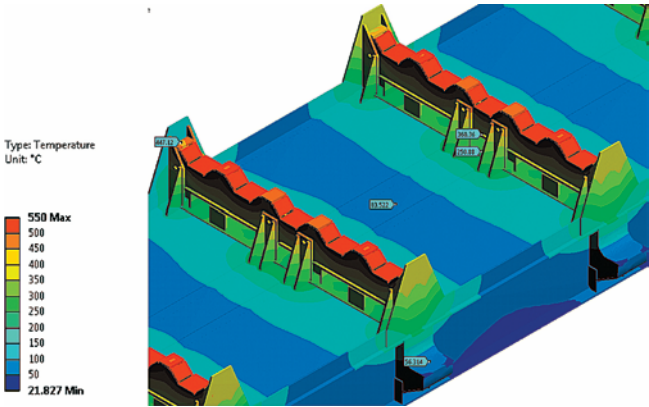


Рис. 6. Распределение температурных полей в элементах рамы вагона-термоса (фрагмент)

Таблица 2

Сравнение теоретических и экспериментальных значений температур в элементах рамы вагона-термоса

| Элемент рамы | Эксперимент, °С | Теоретический расчет, °С | Погрешность, % |
|----------------------------|-----------------|--------------------------|----------------|
| Хребтовая балка | 51 | 56 | 9 |
| Настил пола (снизу) | 114 | 129 | 11 |
| Боковая обвязка | 43 | 37 | 14 |
| Колпак: | | | |
| вертикальные боковые стены | 40 | 37 | 8 |
| опорные балки | 73 | 54 | 26 |

Кроме того, могут различаться реальные и используемые значения коэффициентов теплопроводности шамотной подсыпки и фетровой теплоизоляции, что обусловлено возможным отклонением между значениями реальных и расчетных температур. Тем не менее, несмотря на некоторые отличия реальной конструкции и ее параметров от использованных в модели, средняя погрешность не превышает 15 %. Это подтверждает адекватность разработанной модели термонагруженности вагона-термоса и позволяет использовать ее для численных экспериментов.

Литература

1. Даниленко Д. В., Намятов А. В., Лапшин В. Ф. Особенности технологии проектирования специализированных грузовых вагонов // Инновационный транспорт. 2013. № 2. С. 24–29.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
3. Павлюков А. Э., Занкович А. В., Середа А. Б. Исследование тепловых процессов в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов конвективным разогревом // Транспорт Урала. 2010. № 4 (27). С. 56–61. ISSN 1815-9400.
4. Речкалов С. Д. Напряженно-деформированное состояние сварных элементов кузова вагона для сыпучих металлургических грузов с учетом температурных воздействий : дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. 295 с.
5. Миронов А. А., Образцов В. Л., Павлюков А. Э. Теория и практика бесконтактного теплового контроля буксовых узлов в поездах. Екатеринбург : РПФ «Ассорти», 2012. 396 с.
6. Тищенко П. А. Нестационарные температурные поля в элементах дискового тормоза скоростного вагона с учетом неустойчивости теплового контакта : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2003. 175 с.
7. Шабуров А. Д., Мирзаев Д. А., Мальцев И. В. Теплофизический закон охлаждения поковок в термосе // Вестник ЮУрГУ. 2010. № 13. Сер. Металлургия. Вып. 14. С. 77–80.
8. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. М. : Металлургиздат, 1962. 567 с.
9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М. : Энергия, 1977. 344 с.
10. Чернов А. Решение задач теплообмена в ANSYS Workbench // САПР и графика. 2006. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=15606&iid=704> (дата обращения: 20.11.2013).
11. ANSYS Workbench. Тепловой анализ : учеб. пособие / Пер. с англ. О. М. Огородниковой. Екатеринбург : УрФУ, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://cae.ustu.ru/download/ansys4.pdf> (дата обращения: 20.11.2013).

References

1. Danilenko D. V., Namyatov A. V., Lapshin V. F. Osobennosti tekhnologii proektirovaniya spetsializirovannykh gruzovykh vagonov [Special-purpose freight cars design specifics] // Innovatsionnyy transport. 2013. № 2. P. 24–29.
2. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Standards for design and engineering of railway cars of the Russian Ministry of Railways with 1520 mm gauge (non-self propelled)]. M. : GosNIIV ; VNIIZhT, 1996. 319 p.
3. Pavlyukov A. E., Zankovich A. V., Sereda A. B. Issledovanie teplovykh protsessov v vagonakh pri vosstanovlenii sypuchesti smerzhikhhsya gruzov konvektivnym razogrevom [Study of thermal processes in railcars when restoring flowability of frozen goods by convective heating] // Transport of the Urals. 2010. № 4 (27). P. 56–61. ISSN 1815-9400.
4. Rechkalov S. D. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie svarnykh elementov kuzova vagona dlya sypuchikh metallurgicheskikh gruzov s uchetom temperaturnykh vozdeystviy : dis. ... kand. tekhn. nauk [Stress-strain state of welded elements of the car body for bulk metallurgical goods, with account to temperature effects : PhD in Engineering Thesis]. M., 1987. 295 p.
5. Mironov A. A., Obratsov V. L., Pavlyukov A. E. Teoriya i praktika beskontaktnogo teplovogo kontrolya buksovykh uzlov v poezdakh [Theory and practice of non-contact thermal monitoring of axle boxes in trains]. Ekaterinburg : Assorti, 2012. 396 p.
6. Tischenko P. A. Nestatsionarnye temperaturnye polya v elementakh diskovogo tormoza skorostnogo vagona s uchetom nestabilnosti teplovogo kontakta : dis. ... kand. tekhn. nauk [Unsteady temperature fields in high-speed car disc brake components with account to instability of the thermal contact : PhD in Engineering Thesis]. Bryansk, 2003. 175 p.
7. Shaburov A. D., Mirzaev D. A., Maltsev I. V. Teplofizicheskiy zakon okhlazhdeniya pokovok v termose [Thermophysical law of forging cooling in an insulated railcar] // Vestnik YuUrGU. 2010. № 13. Ser. Metallurgiya. Vyp. 14. P. 77–80.
8. Tayts N. Yu. Tekhnologiya nagreva stali [Steel heating technology]. M. : Metallurgizdat, 1962. 567 p.
9. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Osnovy teplotperedachi [Fundamentals of heat transfer]. M. : Energiya, 1977. 344 p.
10. Chernov A. Reshenie zadach teploobmena v ANSYS Workbench [Solving heat transfer problems in ANSYS Workbench] // SAPR i grafika. 2006. № 2 [Electronic resource]. URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=15606&iid=704> (date accessed: 20.11.2013).
11. ANSYS Workbench. Teplovoy analiz : ucheb. posobie / Per. s angl. O. M. Ogorodnikovoy [ANSYS Workbench. Thermal analysis : a textbook / Translated from English]. Ekaterinburg : UrFU, 2009 [Electronic resource]. URL: <http://cae.ustu.ru/download/ansys4.pdf> (date accessed: 20.11.2013).

УДК 629.463.32

Виктор Николаевич Филиппов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),
Игорь Викторович Козлов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),
Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Ярослав Дмитриевич Подлесников, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНОВ С УВЕЛИЧЕННОЙ ВЫСОТОЙ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Viktor Nikolayevich Filippov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railcars and Rolling Stock, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),
Igor Viktorovich Kozlov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railcars and Rolling Stock, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),
Alexander Vasilievich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Yaroslav Dmitrievich Podlesnikov, graduate student, Department of Railcars and Rolling Stock, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

Regarding the issue of safe operation of cars with increased height of center of gravity

Аннотация

Предприятия и перевозочные компании производят и эксплуатируют цистерны для транспортировки сжиженных газов и нефтебензиновые цистерны с диаметром котла 3200 мм, имеющие повышенный центр тяжести. Эти цистерны должны проходить специальные испытания по оценке устойчивости в кривых малого радиуса, в режимах трогания с места и торможения. В связи с повышением скоростей движения пассажирских поездов условия эксплуатации таких цистерн будут ухудшаться. В статье рассматривается методика оценки устойчивости экипажа по величине коэффициента запаса устойчивости с учетом всего комплекса сил, действующих на вагон при прохождении кривых пути.

Ключевые слова: центр тяжести, кривая, возвышение рельса, устойчивость колеса.

Summary

Enterprises and carriers produce and use tank car for the transport of liquefied gases and oil and petrol tank cars with a boiler diameter of 3200 mm with higher center of gravity. These tanks must undergo special tests to assess stability on small-radius curves, in pulling away and braking modes. Due to increasing passenger train speeds, operating conditions of such tank cars will deteriorate. The papers describes the technique of assessing underframe stability by safety factor value, taking into account the whole complex of forces acting on the car when curving.

Keywords: center of gravity, curve, cant, wheel resistance.

Стратегия инновационного развития железнодорожного транспорта России [1] предусматривает разработку и выпуск вагонов повышенной грузоподъемности. В настоящее время ряд предприятий и перевозочных компаний достаточно активно производят и эксплуатируют цистерны для перевозки сжиженных газов и нефтебензиновые цистерны с диаметром котла 3200 мм. Это цистерны с повышенным центром тяжести. Однако, насколько известно авторам данной статьи, ходовые динамические испытания таких цистерн в кривых малого радиуса, в режимах трогания с места и торможения не проводились.

Одновременно на некоторых направлениях железнодорожной колеи общего назначения ведутся работы по организации движения скоростных поездов. В связи с этим может возникнуть необходимость в увеличении возвышения наружного рельса в кривых, но в то же время следует учитывать возможности движения грузовых поездов с низкими скоростями. Напомним, что на железных дорогах России преобладает смешанное движение, т.е. по одним и тем же участкам (прямым и кривым) проходят поезда разного назначения, с различными скоростями, разным весом, силовым воздействием на путь и т.п. Следовательно, возвышение наружного рельса в кривых участках пути должно отвечать ряду требований.

Первое требование, определяющее величину возвышения, — уровень непогашенного ускорения пассажирского вагона. При этом скорости движения поезда могут быть определены по формуле [2]

$$12,5 \frac{V_{\min}^2}{R} + 115 \geq h_t \geq 12,5 \frac{V_{\max}^2}{R} - 115, \quad (1)$$

где h_t — возвышение наружного рельса в кривой, мм;
 V_{\min} и V_{\max} — минимальная и максимальная скорости, км/ч.

Сопоставление параметров кривой, вычисленных по формуле (1), с результатами расчета возвышения на основе эксплуатационной работы всех поездов с учетом их весовых характеристик и скоростей движения показывает почти двукратное различие.

В 1990-х гг. эксплуатационные испытания цистерн в тяжеловесных поездах на Дальневосточном полигоне подтвердили высокую эффективность 8-осных цистерн, среднесуточный пробег которых достигал 800 км при весе поезда около 8000 т. При этом полигон эксплуатации характеризуется как сложный, с большим количеством кривых, протяженность которых в два раза превышает среднесетевые значения на железных дорогах европейской части страны. Особое внимание при испытаниях обращалось на износ гребней колесных пар и обеспечение безопасности движения.

Было отмечено определенное количество сходов 8-осных цистерн в крутых кривых радиусом 350–500 м на ограниченном числе конкретных перегонов. По результатам расследования этих инцидентов установлено, что основной причиной схода было несоответствие режимов ведения поезда в кривых радиусом 350–500 м с большим возвышением рельса 130–150 мм. Тяжеловесные поезда на участке дороги с кривыми малого радиуса и большим возвышением рельса при малых скоростях идут с полной безгрузкой колес по наружной ветке пути, а зачастую и с отрывом колеса от рельса, что было неоднократно зафиксировано при видеосъемке процесса.

В это же время были разработаны и произведены цистерны с диаметром котла 3200 мм и более для БАМа (включая цистерны габарита Т) [3]. Серия испытаний таких цистерн выявила определенные ограничения по скоростям движения, что послужило препятствием для запуска в серийное производство цистерн модели 15-880 с диаметром котла 3400 мм. По заданию компании «СГ-транс» МИИТ разрабатывал вариант 4-осной цистерны для сжиженных углеводородных газов модели 15-905R с диаметром котла 3200 мм. Однако результаты испытаний по оценке устойчивости такой цистерны не позволили рекомендовать ее к серийному производству. Ограничением стало несоответствие показателей динамики по коэффициенту запаса устойчивости от вкатывания колеса на головку рельса.

Из формулы (1) видно, что при возвышении рельса 150 мм минимально допустимая скорость движения по кривой с радиусом 350 м будет равна 31,3 км/ч, что для грузовых поездов совершенно неприемлемо. Очевидно, что в условиях эксплуатации не учитываются режимы движения и возможность останова поездов.

Кроме того, МИИТом совместно с МЗТМ (Мариуполь) при создании цистерны модели 15-9503 АВП (пропан, бутан и их смеси) с диаметром котла 3000 мм в качестве ходовых частей использовалась тележка со скользунами непрерывного контакта фирмы «А.Стаки». Реализация «слепых» зазоров в скользу-

нах привела к сходам цистерн в режимах движения по кривым с малыми скоростями.

В связи с вышеизложенным авторы считают целесообразным поделиться опытом по обеспечению безопасности эксплуатации вагонов с увеличенным диаметром котла.

Устойчивость экипажа оценивается по величине коэффициента запаса устойчивости, который в соответствии с нормами [4] может быть вычислен по формуле

$$K_y = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P_v}{P_6},$$

где β — угол между образующей гребня колеса и горизонталью;
 μ — коэффициент трения между колесом и рельсом;

P_v и P_6 — силы вертикального и бокового воздействия набегающего колеса на внешний или внутренний рельсы.

При определении бокового воздействия набегающего колеса (P_6) следует учитывать сумму сил: горизонтальной составляющей, обусловленной наклоном вагона в кривой за счет возвышения рельса (P_p); горизонтальной составляющей продольных сил в поезде (P_T); расчетной величины силы ветра (P_q); горизонтальной составляющей центробежных сил ($P_{ц}$); горизонтальной реакции на гребне колеса, преодолевающей момент сил трения в шкворневом узле (на подпятнике и скользунах) при повороте тележки относительно вагона в кривой ($P_{тр}$), т.е.

$$P_6 = P_p + P_T + P_q + P_{ц} + P_{тр}.$$

Горизонтальная составляющая, обусловленная наклоном вагона в кривой за счет возвышения рельса, вычисляется как

$$P_p = p_o \cdot \frac{z}{2S},$$

где p_o — расчетная нагрузка на ось;

z — возвышение рельса в кривой с учетом фактических перекосов;

$2S$ — ширина колеи в кривой.

Горизонтальная составляющая продольных сил в поезде:

$$P_T = \frac{N \cdot 2L_{\text{сц}}}{n \cdot 2R},$$

где N — продольная сила в поезде (растягивающая или сжимающая);

$2L_{\text{сц}}$ — длина вагона по осям сцепления автосцепок;

n — количество осей в вагоне;

R — радиус кривой.

Расчетная величина силы ветра:

$$P_q = \frac{F \cdot q}{n},$$

где F — площадь боковой поверхности вагона;

q — удельное давление ветра;

n — количество осей в вагоне.

Горизонтальная составляющая центробежных сил:

$$P_{ц} = \frac{m \cdot V^2}{n \cdot R},$$

где m — масса вагона;

V — скорость движения в кривой.

Горизонтальная реакция на гребне колеса, преодолевающая момент сил трения в шкворневом узле при повороте тележки относительно вагона в кривой (т.е. обеспечивается поворот тележки):

$$P_{тр} = \frac{R_{п} \cdot \frac{d_{п}}{2} \cdot \mu_{п} + R_{ск} \cdot b_1 \cdot \mu_{ск}}{2l_T},$$

где $R_{п}$, $R_{ск}$ — соответственно вертикальная реакция на подпятнике двухосной тележки и на скользунах;

$d_{п}$ — диаметр подпятника тележки;

$\mu_{п}$, $\mu_{ск}$ — соответственно коэффициенты трения скольжения на подпятнике и на скользунах;

b_1 — половина расстояния между осями скользунов вагона;

$2l_T$ — база тележки.

При определении вертикальной нагрузки на колесо и вертикальных реакций на подпятнике и скользунах необходимо учитывать поперечное смещение положения центра тяжести вагона, вызванное возвышением одного рельса, замыканием зазоров в скользунах и дополнительным наклоном кузова за счет различной деформации рессор (рис. 1).

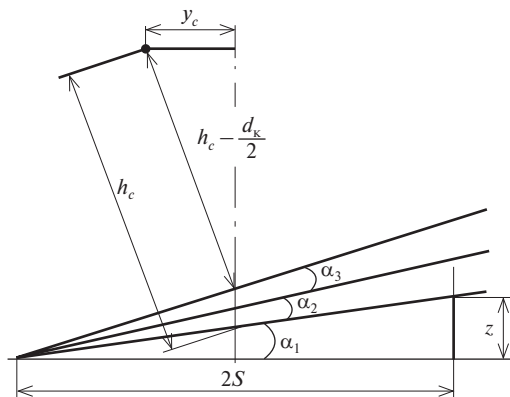


Рис. 1. Расчетная схема для определения поперечного смещения положения центра тяжести цистерны в кривой

Углы наклона вагона в кривой за счет возвышения рельса (α_1) и за счет зазоров в скользунах (α_2) вычисляются по зависимостям:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{z}{2S};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\varepsilon}{2b_1},$$

где ε — суммарные зазоры в скользунах между наддрессорной балкой и кузовом вагона;

$2b_1$ — расстояние между осями скользунов.

Для определения угла α_3 , обусловленного разной деформацией рессор, целесообразно воспользоваться схемой, представленной на рис. 2.

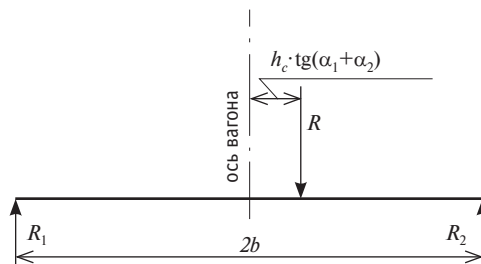


Рис. 2. Схема определения угла, обусловленного разной деформацией рессор

Из рис. 2 следует:

$$R = R_1 + R_2 = 2 \cdot p_o - P_{тл},$$

где R_1 , R_2 — реакции рессорных комплектов двухосной тележки; $P_{тл}$ — вес необрессоренных частей двухосной тележки.

Выполнив вычисления, получим тангенс искомого угла наклона:

$$R[b + h_c \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2)] = R_2 \cdot 2b;$$

$$R_2 = \frac{R[b + h_c \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2)]}{2b},$$

$$R_1 = 2 \cdot p_o - P_{тл} - R_2;$$

$$f_{1,2} = \frac{R_{1,2}}{c};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{f_2 - f_1}{2b},$$

где h_c — высота центра тяжести вагона от уровня рельсов;

$2b$ — расстояние между осями рессорных комплектов;

c — вертикальная жесткость рессорного комплекта;

f_1, f_2 — деформации рессорных комплектов.

При определении деформации рессорных комплектов пренебрегаем ветровой нагрузкой и центробежной силой.

Следовательно, суммарное поперечное смещение положения центра тяжести вагона в кривой будет равно

$$y_c = h_c \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) + \left(h_c - \frac{d_k}{2}\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_3,$$

где d_k — диаметр колеса по кругу катания.

Вертикальные нагрузки на подпятнике двухосной тележки и скользунах в этом случае могут быть определены из схемы, представленной на рис. 3.

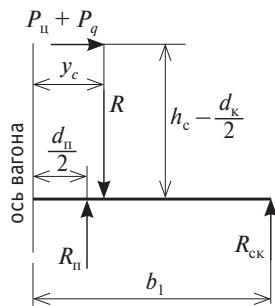


Рис. 3. Схема вертикальных нагрузок, действующих на подпятник и скользуны двухосной тележки

Вертикальные нагрузки, действующие на подпятник двухосной тележки и скользуны, находим по формулам:

$$R_n = R - R_{ck};$$

$$R \cdot \left(y_c - \frac{d_n}{2} \right) + (P_u + P_q) \cdot (h_c - h_n) = R_{ck} \left(b_1 - \frac{d_n}{2} \right);$$

$$R_{ck} = \frac{R \cdot \left(y_c - \frac{d_n}{2} \right) + (P_u + P_q) \cdot (h_c - h_n)}{b_1 - \frac{d_n}{2}},$$

где h_n — высота пятника тележки от головки рельса;

d_n — диаметр пятника;

P_u, P_q — составляющие центробежной силы и силы ветра, приведенные к одной тележке.

Полученные значения R_n и R_{ck} позволяют рассчитать $P_{тр}$. Таким образом, все составляющие для определения силы бокового воздействия набегающего колеса имеются.

Вычисляем вертикальные реакции на колесах P_1 и P_2 :

$$p_o = P_1 + P_2;$$

$$P_2 = \frac{p_o \cdot \left(\frac{2S}{2} - y_c \right)}{2S},$$

где $2S$ — ширина колеи.

Ординаты центров тяжести порожнего и груженого вагонов соответственно рассчитываем по формулам:

$$h_{сп} = \frac{\sum P_i h_i}{T};$$

$$h_{гр} = \frac{\sum P_i h_i + Q_r h_r}{T + Q},$$

где P_i — вес кузова вагона, рамы с тормозным и автосцепным оборудованием и ходовых частей;

Q_r — вес груза;

T — суммарная тара вагона;

h_i, h_r — ординаты центров тяжести узлов вагона и перевозимого груза соответственно.

Порядок определения высоты центра тяжести h_{cr} необходимой для установления вертикальных нагрузок, приведен на рис. 4.

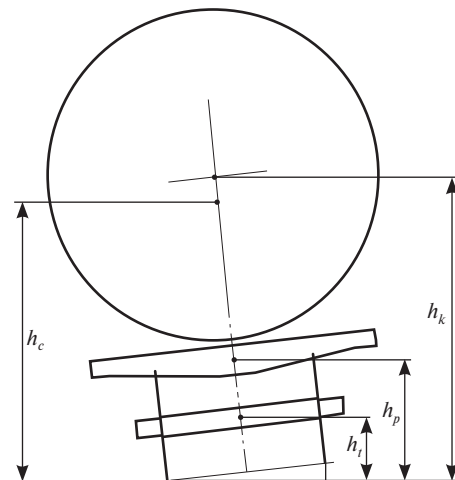


Рис. 4. Расчетная схема для определения высоты центра тяжести цистерны

Статический прогиб рессорного подвешивания под действием груза находим по формуле

$$f = \frac{Q_r}{2} \cdot \lambda,$$

где λ — гибкость рессорного комплекта.

Проведенное МИИТом поколесное взвешивание цистерн на стенде ВНИИЖТа показало, что даже на хорошем участке пути разность вертикальных нагрузок по двухосной тележке может достигать 25%.

При производстве цистерн большого диаметра в 1980–1990 гг. вопросу положения центра тяжести уделялось большое внимание. Так, на первых безрамных цистернах для снижения положения центра тяжести применялись ниши в консольных частях. Однако переход на 8-осные цистерны, обладающие лучшими динамическими качествами, сделал проблему неактуальной до момента создания для БАМа цистерны габарита Тц (мод. 15-880) с диаметром котла 3400 мм. Как отмечалось выше, ходовые динамические испытания этих цистерн показали, что устойчивость при движении в кривых не обеспечивается. Данное обстоятельство, по существу, привело к прекращению дальнейших работ по созданию цистерн с увеличенным диаметром котла.

По заданию Забайкальской железной дороги на основании изложенной выше методики МИИТом были выполнены расчеты устойчивости движения различных видов цистерн на конкретных участках и разработаны рекомендации по снижению возвышения наружного рельса в кривых до величины, определяемой по средневзвешенной скорости движения. Результаты исследований рассматривались на научно-техническом сове-

те Забайкальской железной дороги и были приняты к реализации, после чего сходы цистерн прекратились.

Проводимые в настоящее время работы по повышению скоростей движения на ряде направлений при эксплуатации на этих же путях грузовых поездов могут создать предпосылки для возникновения аварийных ситуаций в связи с увеличением возвышения наружного рельса.

Проведенные ранее МИИТом теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что на выходе из кривой малого радиуса при наличии достаточно большого возвышения наружного рельса и при малых скоростях колеса, движущееся по наружному рельсу, обезгружено. В табл. 1 приведены коэффициенты запаса устойчивости от вкатывания колеса на головку рельса для нагруженного k_1 и обезгруженного k_2 колеса на выходе из кривой в зависимости от величины возвышения наружного рельса. Расчеты выполнены для цистерн с диаметрами котлов 3000 (мод. 15-908R) и 3200 мм (мод. 15-1780). В этом случае даже при незначительной силе

трения между гребнем колеса и рельсом, направленной вверх, может произойти вкатывание колеса на рельс и соответственно сход наружу кривой.

Таким образом, при создании вагонов, перевозящих опасные грузы и имеющих увеличенную высоту центра тяжести, необходимо проводить тщательные теоретические и экспериментальные исследования. Эти исследования должны быть посвящены устойчивости вагонов на кривых малого радиуса с большим возвышением наружного рельса при скоростях, близких к равновесным, и при малых скоростях движения. Кроме того, также необходимо учитывать различные режимы тяги, при которых состав не только растягивается, но и сжимается.

Одновременно мы хотим обратить внимание специалистов на необходимость коренной переработки норм содержания рельсовой колеи, поскольку в них отсутствуют нормативные значения просадок, перекосов, неровностей в плане рельсовой колеи. Это обстоятельство может негативно сказаться на обеспечении безопасности движения вагонов.

Таблица 1

Значения коэффициентов запаса устойчивости колеса
от вкатывания на головку рельса для цистерн с диаметром котла 3000 и 3200 мм

| $V, \text{ км/ч}$ | $h_p, \text{ мм}$ | $R, \text{ м}$ | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 350 | | | | 500 | | | |
| | | k_1 | | k_2 | | k_1 | | k_2 | |
| | | 15-908R | 15-1780 | 15-908R | 15-1780 | 15-908R | 15-1780 | 15-908R | 15-1780 |
| 10 | 150 | 3,04 | 2,96 | 2,37 | 2,01 | 3,23 | 3,14 | 2,63 | 2,22 |
| | 0 | 7,13 | 6,63 | 6,59 | 6,07 | 8,72 | 8,04 | 8,06 | 7,36 |
| 20 | 150 | 2,42 | 2,2 | 1,49 | 1,29 | 2,55 | 2,5 | 1,8 | 1,55 |
| | 0 | 3,41 | 3,24 | 3,15 | 2,97 | 4,51 | 4,26 | 4,17 | 3,9 |
| 40 | 150 | 1,09 | 1,08 | 0,6 | 0,53 | 1,39 | 1,38 | 0,8 | 0,7 |
| | 0 | 1,1 | 1,07 | 1,02 | 0,98 | 1,54 | 1,48 | 1,42 | 1,36 |
| 60 | 150 | 0,59 | 0,59 | 0,3 | 0,27 | 0,79 | 0,79 | 0,41 | 0,37 |
| | 0 | 0,52 | 0,5 | 0,48 | 0,46 | 0,73 | 0,71 | 0,68 | 0,65 |

Литература

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года. Белая книга ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (дата обращения: 11.10.2013).
2. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Вериги. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
3. Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава / А. В. Смольянинов, В. Н. Филиппов, И. В. Козлов, А. Н. Давыдов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 46–49. ISSN 1815-9400.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосВНИИВ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.

References

1. Strategiya innovatsionnogo razvitiya ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda. Belaya kniga ОАО «RZhD» [Innovative development strategy of JSC Russian Railways for the period until 2015. White Paper of JSC Russian Railways]. [Electronic resource]. URL: http://rzd-expo.ru/innovation/Strategia_in_razvit.pdf (date accessed: 11.10.2013).
2. 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 p.
3. Parametry i konstruktivnoe ispolnenie vysokoproizvoditelnogo podvizhnogo sostava [Parameters and designs of high-performance rolling stock] / A. V. Smolyaninov, V. N. Filippov, I. V. Kozlov, A. N. Davydov // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 46–49. ISSN 1815-9400.
4. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Standards for design and engineering of railway cars of the Russian Ministry of Railways with 1520 mm gauge (non-self propelled)]. M.: GosVNIIV; VNIIZhT, 1996. 319 p.

УДК 629.4.027.115

Анатолий Васильевич Бородин, доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),
Юлия Алексеевна Иванова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),
Дмитрий Борисович Гриц, аспирант Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ БУКС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Anatoliy Vasiliyevich Borodin, DSc in Engineering, Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Omsk State University of Railways (OmGUPS),
Yulia Alexeyevna Ivanova, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Omsk State University of Railways (OmGUPS),
Dmitriy Borisovich Grits, graduate student, Omsk State University of Railways (OmGUPS)

Performance specifics of freight car axle boxes

Аннотация

Приведен обзор эксплуатационных особенностей букс грузовых вагонов с коническими и цилиндрическими кассетными подшипниками отечественного и зарубежного производства. Отмечены наиболее распространенные неисправности таких букс в условиях повышенной нагрузки на ось и увеличенной скорости движения поездов.

Предложены альтернативные конструктивные решения букс с разделением восприятием составляющих комбинированной нагрузки, осевые упоры скольжения и качения для восприятия горизонтальной составляющей, а также конструкция радиального подшипника, предназначенного для работы в составе комбинированной опоры оси грузового вагона.

Ключевые слова: букса грузового вагона, подшипник, осевой упор.

Summary

The paper provides an overview of operational features of axle boxes of freight rail cars with foreign and domestic conical and cylindrical cluster bearings. The most common faults of such axle boxes are identified in the context of high axle loads and increased train speed.

Alternative axle box design solutions are proposed with separate accommodation of combined load components; sliding and rolling stops accommodate horizontal component, as well as radial bearing design, intended for use as part of combined freight car axle support.

Keywords: rail car axle box, bearing, axial stop.

К числу важнейших задач развития железнодорожного транспорта относятся разработка и внедрение энергоэффективного подвижного состава повышенной грузоподъемности для высокоскоростного движения. Новые модели деталей грузовых вагонов, в частности букс, создаются как результат совместных разработок ОАО «РЖД» и ведущих отечественных и зарубежных производителей.

В настоящее время в буксах грузовых вагонов наряду с двумя традиционными радиальными роликовыми испытываются и эксплуатируются конические двухрядные подшипники производства компаний SKF, Timken и Amsted Rail («ЕПК-Brenco»).

По мнению профессионального сообщества, в России на сегодняшний день необходимо развивать оба направления — и конические кассетные, и цилиндрические подшипники [1].

Применение адаптеров для установки конических подшипников в буксовый проем боковой рамы приводит к возникновению ряда неисправностей. Адаптеры изнашиваются по поверхностям контакта с подшипником и буксовым проемом, а также могут смещаться в осевом направлении. В процессе эксплуатации подшипники в адаптерах проворачиваются. Износ седла и упорных буртов адаптера приводит к неравномерному распределению нагрузки между рядами роликов двухрядного подшипника и появлению полос на его наружных кольцах. Осевое смещение и перекося адаптера становятся причиной повреждений торцевой шайбы или заднего упорного кольца.

Следует отметить, что в буксах с коническими кассетными подшипниками возникают основные дефекты, характерные для букс с цилиндрическими подшипниками: ослабление посадочного натяга и торцевого крепления, образование трещин и сколов колец, ослабление или повреждение уплотнения, обводнение смазочного материала, повышенный нагрев [2]. Внешние признаки перечисленных дефектов и действия, которые необходимо предпринимать в случае их обнаружения, изложены в инструкциях, разработанных производителями, а также в нормативных документах, утвержденных ОАО «РЖД».

В данной статье рассмотрены эксплуатационные особенности букс с цилиндрическими подшипниками и предложены конструктивные решения, направленные на повышение их работоспособности.

На восприятие нагрузки между двумя подшипниками или между двумя рядами тел качения существенное воздействие оказывает изгиб шейки вагонной оси под нагрузкой, так как каждый тип подшипника эффективно работает при определенных значениях угла поворота оси. Взаимный перекок колец возникает при упругой деформации шейки оси под влиянием радиальных составляющих сил, действующих на колесную пару вагона.

Чтобы исследовать, как изгибная жесткость оси колесной пары грузового вагона зависит от статической нагрузки, выполнен конечно-элементный расчет прогибов и углов поворота сечений оси (рис. 1) с помощью программного комплекса «APM WinMachine».

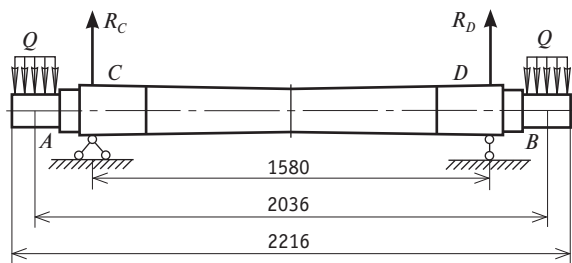


Рис. 1. Расчетная схема нагружения оси колесной пары

Распределение величины прогиба и угла поворота сечения вдоль оси при нагрузке на ось 23,5 тс представлено на рис. 2. На рис. 3 приведены значения деформации оси, соответствующие заднему подшипнику, при осевых нагрузках вагона 23,5; 25; 27 и 30 тс.

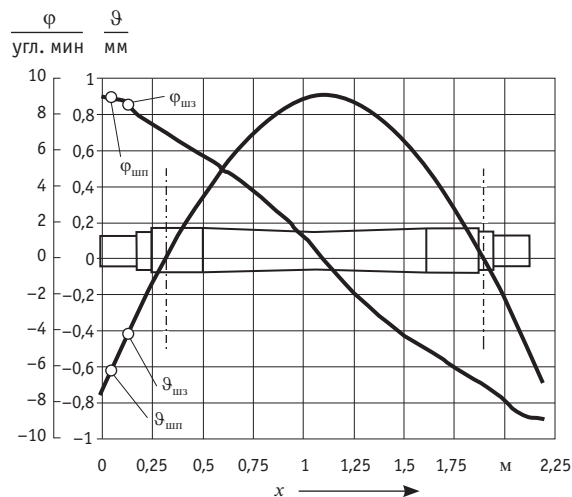


Рис. 2. Зависимости прогиба $\vartheta(x)$ и угла поворота сечения оси $\varphi(x)$ при статической нагрузке веса-брутто вагона:

$\vartheta_{шп}$, $\varphi_{шп}$ — величины прогиба и угла поворота сечения, соответствующие расположению среднего сечения переднего подшипника; $\vartheta_{шз}$, $\varphi_{шз}$ — то же для заднего подшипника

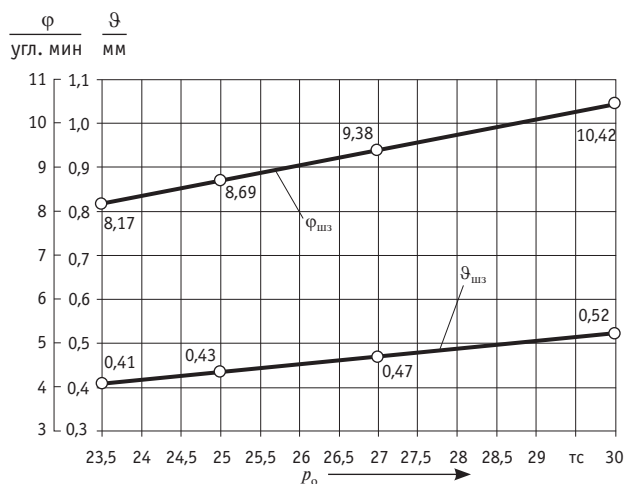


Рис. 3. График зависимости прогиба ϑ и угла поворота сечения оси φ от осевой нагрузки p_o

Можно заключить, что для надежной работы буксы требуются конструктивные решения подшипникового узла с эффективным восприятием нагрузки в условиях перекока шейки оси и значительных краевых давлений на тела качения.

Для снижения концентрации краевых давлений роликов на кольца предлагается конструкция двухрядного радиально-подшипника с короткими цилиндрическими роликами и внутренним и наружным кольцами в виде втулок без бортов из стали с твердостью 61–63 единицы по Роквеллу, шкала С (рис. 4) [3].

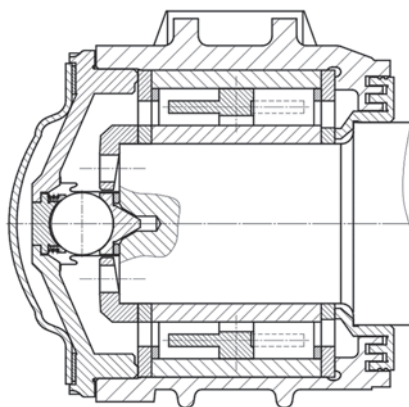


Рис. 4. Букса колесной пары грузового вагона с осевым упором

Уменьшение концентрации краевых давлений осуществляется следующим образом: при изгибе под нагрузкой оси колесной пары происходит перекок внутреннего кольца относительно наружного, что вызывает краевые концентрации контактных нагрузок, которые существенно снижаются при взаимодействии кромок роликов с концевыми коническими участками колец из-за их податливости. Этому способствует пониженная твердость материалов колец и разделение твердых рабочих поверхностей каждого кольца на части радиусными канавками. Рамная нагрузка на буксу воспринимается рабочими поверхностями

торцов роликов и бортов колец в неблагоприятном для подшипника качения режиме трения скольжения пары «торец ролика — борт кольца».

Сократить количество неисправностей, вызванных износом направляющих поверхностей колец и торцов роликов подшипника буксы грузового вагона, можно, если переложить эту функцию на самоустанавливающийся осевой упор (см. рис. 4) [4].

Исключение бортов колец из схемы передачи горизонтальной нагрузки позволяет вместо двух одинарных установить один сдвоенный цилиндрический роликоподшипник [5].

Улучшить восприятие горизонтальной нагрузки в буксе с цилиндрическими роликами можно за счет введения осевого упо-

ра качения [6]. Трение качения в упорном устройстве позволяет снизить сопротивление вращению в опоре и оптимизировать триботехнические параметры опоры.

Таким образом, эксплуатационные особенности букс грузовых вагонов, снижающие их работоспособность, проще устранить, используя цилиндрические роликовые подшипники. Чтобы повысить работоспособность буксы, в ее конструкцию предлагается ввести осевой упор, увеличить жесткость шейки оси, применяя сдвоенный роликоподшипник. Такие изменения можно выполнить с сохранением габаритных размеров эксплуатируемой буксы, при этом повышается долговечность подшипников и ресурс буксового узла в целом.

Литература

1. Житенев Ю. А. Машиностроители — российским железнодорожникам // Локомотив. 2012. № 6. С. 2–5.
2. Сергеев К. А., Францев А. Н. Повышение работоспособности буксового узла с кассетным подшипником // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 58–62. ISSN 0044-4448.
3. Пат. 105872 Российская Федерация, МПК В 61 F 15/12. Букса с цилиндрическим роликоподшипником / Бородин А. В., Иванова Ю. А., Ковалев М. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2011100370/11; заявл. 11.01.11; опубл. 27.06.11, Бюл. № 18. 5 с. : ил.
4. Пат. 82011 Российская Федерация, МПК F 16 C 17/04. Подшипник со сферическими упорными поверхностями / Бородин А. В., Иванова Ю. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2008145684/22; заявл. 19.11.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10. 3 с. : ил.
5. Бородин А. В., Иванова Ю. А. Повышение ресурса цилиндрических подшипников буксы грузового вагона : монография / ОмГУПС. Омск, 2011. 102 с.
6. Пат. 2309865 C1 Российская Федерация, МПК В 61 F 15/12. Букса с цилиндрическими роликоподшипниками / Бородин А. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. № 2006114319/11; заявл. 26.04.06; опубл. 10.11.07, Бюл. № 31. 12 с. : ил.

References

1. Zhitenev Yu. A. Mashinostroiteli — rossiyskim zheleznodorozhnikam [Machine builders' address to Russian railroad engineers] // Lokomotiv. 2012. № 6. P. 2–5.
2. Sergeev K. A., Frantsev A. N. Povyshenie rabotosposobnosti buksovogo uzla s kassetnym podshipnikom [Increasing efficiency of axle unit using a cluster bearing] // Zheleznodorozhnyy transport. 2008. № 7. P. 58–62. ISSN 0044-4448.
3. Pat. 105872 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 61 F 15/12. Buksa s tsilindricheskimi rolikopodshipnikami [Axle box with cylindrical roller bearing] / Borodin A. V., Ivanova Yu. A., Kovalev M. I. ; zayavitel i patentoobladatel Omskiy gos. un-t putey soobscheniya. № 2011100370/11 ; zayavl. 11.01.11 ; opubl. 27.06.11, Byul. № 18. 5 p. : il.
4. Pat. 82011 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F 16 C 17/04. Podshipnik so sfericheskimi upornymi poverkhnostyami [Bearing with spherical thrust surfaces] / Borodin A. V., Ivanova Yu. A. ; zayavitel i patentoobladatel Omskiy gos. un-t putey soobscheniya. № 2008145684/22 ; zayavl. 19.11.08 ; opubl. 10.04.09, Byul. № 10. 3 p. : il.
5. Borodin A. V., Ivanova Yu. A. Povyshenie resursa tsilindricheskikh podshipnikov buksy gruzovogo vagona : monografiya [Improving resource of cylindrical bearings in freight car axle box : a monograph] / Omskiy gos. un-t putey soobscheniya. Omsk, 2011. 102 p.
6. Pat. 2309865 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 61 F 15/12. Buksa s tsilindricheskimi rolikopodshipnikami [Axle box with cylindrical roller] / Borodin A. V. ; zayavitel i patentoobladatel Omskiy gos. un-t putey soobscheniya. № 2006114319/11 ; zayavl. 26.04.06 ; opubl. 10.11.07, Byul. № 31. 12 p. : il.

УДК 656.212.5

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства), Москва,
 Елена Николаевна Тимухина, 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,
 Николай Евгеньевич Окулов, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СТАНЦИОННЫХ ГОРЛОВИН

Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG (Modern National Transportation Technologies), Moscow,
 Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Vadim Yuriyevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
 Nikolay Evgenyevich Okulov, Assistant Lecturer, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Station neck capacity

Аннотация

Пропускная способность станционной горловины зависит от того, сколько параллельных передвижений в ней возможно. Количество последних определяется технологией работы, диспетчерским управлением, загрузкой и случайными факторами. В статье показано, что корректно оценить пропускную способность горловины можно только с помощью имитационной модели.

Ключевые слова: станция, горловина, поток, передвижение, дуга, пропускная способность.

Summary

Capacity of station neck depends on how many parallel movements possible in it. The latter is determined by operation method, dispatching, load and random factors. The article shows that neck capacity could be correctly assessed only using simulation model.

Keywords: station, neck, flow, movement, arc, capacity.

При построении математической модели структуру транспортной системы нужно представить в виде некоторого графа. На рис. 1 показаны элементы транспортной системы с входящим и выходящим вагонопоток с наложением дуг. Под дугой мы понимаем суточный вагонопоток, который должен иметь пропускную способность и время прохождения [1].

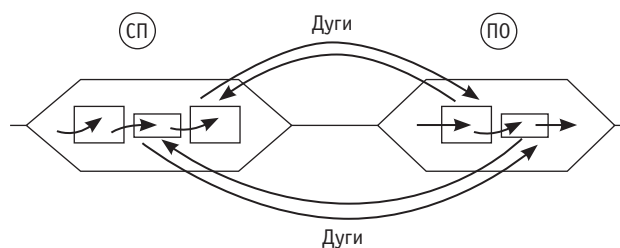


Рис. 1. Поточковый граф:

СП — сортировочный парк; ПО — парк отправления

Однако при моделировании железнодорожных станций заменить горловину с несколькими десятками стрелок структурой из дуг и узлов не представляется возможным. Пропускную способность дуги нельзя задать некоторым числом, так как этот параметр является функцией ряда переменных, которые проявляются только при взаимодействии потока и структуры. И лишь в имитационной модели пропускную способность горловины не задают как исходный параметр, а получают в результате расчета [2].

Пропускная способность горловины напрямую зависит от того, сколько параллельных передвижений в ней возможно [3]. Хотя следует отметить, что максимальная возможность

может быть реализована не всегда. Рассмотрим это на примере реальной горловины одной из станций. Здесь максимальны возможны четыре параллельных передвижения (рис. 2).

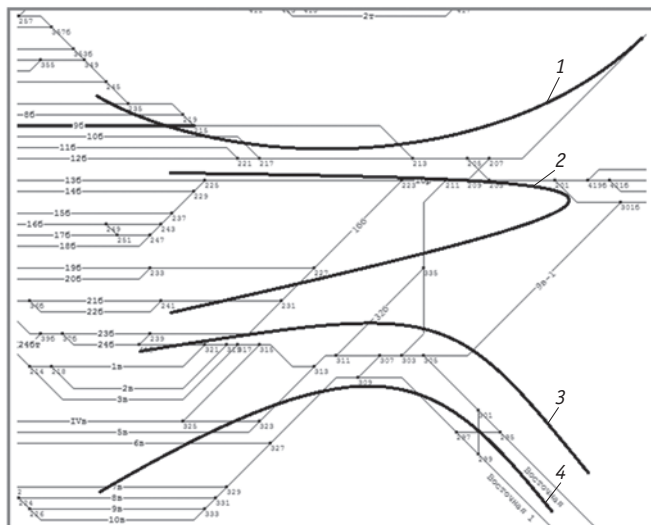


Рис. 2. Технология работы горловины с четырьмя параллельными передвижениями:

1 — 1-я дуга, прием поезда; 2 — 2-я дуга, окончание формирования; 3 — 3-я дуга, прием поезда; 4 — 4-я дуга, отправление поезда

Как видно из рис. 2, в данном случае одновременно выполняются две операции по приему поезда с разных направлений, одна операция по отправлению поезда и, кроме того, осуществляется маневровый заезд в процессе окончания формирования.

При другом наборе операций возможны только три передвижения: прием, отправление поезда и перестановка состава (рис. 3).

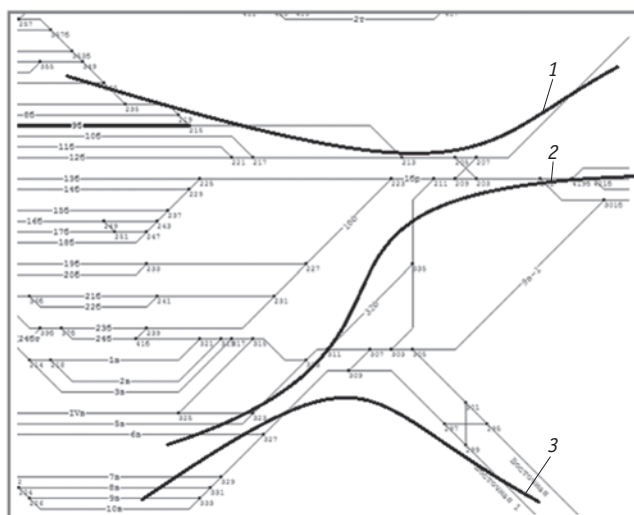


Рис. 3. Технология работы горловины с тремя параллельными передвижениями:

1 — 1-я дуга, прием поезда; 2 — 2-я дуга, перестановка состава; 3 — 3-я дуга, отправление поезда

Но бывают и иные ситуации. Например, только два параллельных передвижения (рис. 4) — прием поезда и перестановка состава. А наименьшая пропускная способность возникает в случае, когда передвижение пересекает всю горловину (рис. 5). Здесь, естественно, возможно только одно передвижение.

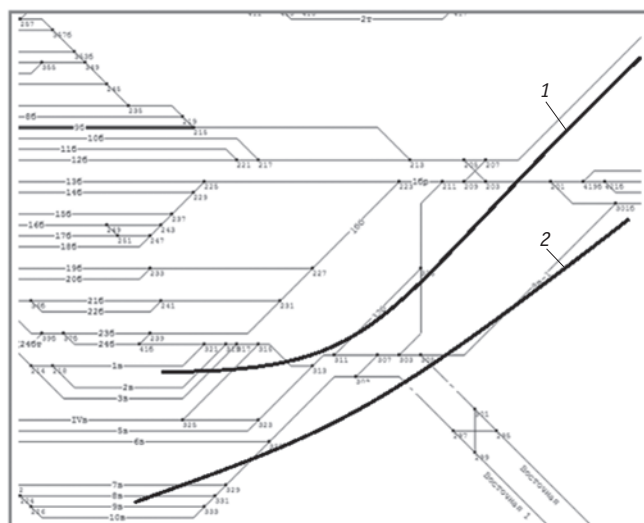


Рис. 4. Технология работы горловины с двумя параллельными передвижениями:

1 — 1-я дуга, прием поезда; 2 — 2-я дуга, перестановка состава

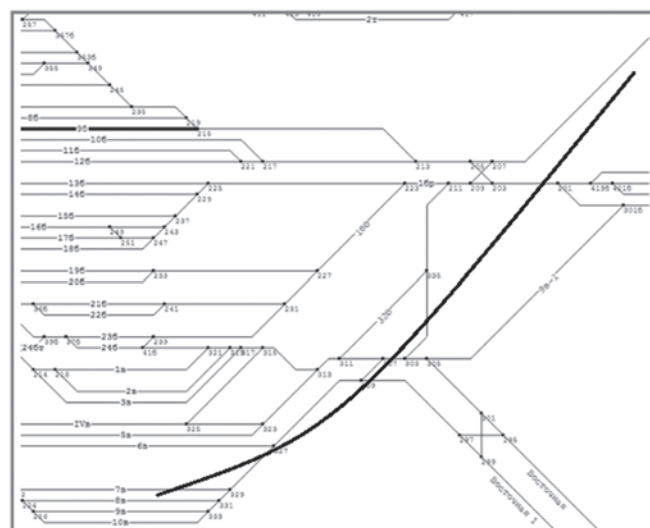


Рис. 5. Технология работы горловины с одним передвижением:
дуга — отправление поезда

Итак, среднюю суточную пропускную способность горловины будем определять как среднее число параллельных передвижений:

$$k = \sum_i k_i \cdot p_i, \quad (1)$$

где k — среднее число параллельных передвижений;

k_i — число передвижений при i -й технологии;
 p_i — вероятность возникновения i -й технологии.

На величину p_i влияют следующие факторы.

Принятая технология работы. Технология работы любого транспортного объекта должна гармонично накладываться на его инфраструктуру [2] и соответствовать структуре потока. Например, одновременные процессы окончания формирования возможны, если выбрана соответствующая специализация в сортировочном парке (рис. 6).

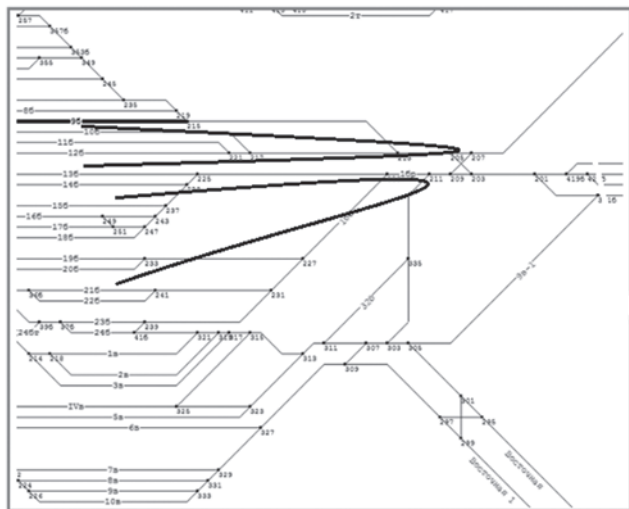


Рис. 6. Технология работы горловины с двумя заездами в процессе окончания формирования

Случайные факторы. На вероятность параллельных передвижений будут влиять колебания в структуре потока и во времени выполнения операций в горловине.

Диспетчерское управление. В зависимости от сложившейся ситуации диспетчер может применить гибкую специализацию путей, спланировать очередность выполнения операций, чтобы повысить параллельность передвижений, и т. п.

Уровень загрузки горловины. При высоком уровне загрузки возникают межоперационные задержки, что меняет харак-

тер запланированной работы и может снизить возможное параллельное выполнение технологических процессов.

В общем случае пропускная способность горловины d — это функция многих переменных, т. е.

$$d = f(S, s, \gamma, Y, \xi_1, \xi_2), \quad (2)$$

где S — структура горловины;

s — поструйная структура потока;

γ — уровень загрузки горловины;

Y — диспетчерское управление;

ξ_1 — уровень случайного разброса в структуре потока;

ξ_2 — уровень случайного разброса в продолжительности операций.

Таким образом, корректно оценить пропускную способность горловины можно только на имитационной модели с учетом вышперечисленных переменных, причем она будет разной в различных условиях. Это надо принимать во внимание при построении моделей расчета железнодорожных станций.

Определение средней пропускной способности горловины через число параллельных передвижений — один из главных факторов при создании имитационной системы для выполнения укрупненных, но в то же время весьма информативных расчетов по проектированию станций и узлов. Не требуя детализации горловины «до стрелки», такая система позволит оценить соответствие между укрупненной структурой станции и существующей или планируемой технологией, соответствие между укрупненной структурой и технологией и планируемым размером движения и т. п., а также выявить горловины, в которых могут возникать наибольшие задержки технологического процесса, и другие узкие места.

Нужно отметить, что проектировщики уже давно поняли необходимость имитационного моделирования. Например, еще в 1981 г. в методическом руководстве по проектированию станций подчеркивалось, что «проверку загрузки отдельных устройств и оценку других технико-эксплуатационных показателей по вариантам проекта... следует выполнять методом моделирования работы станций на ЭВМ» [4]. Однако до сих пор об этом указании забывают в теоретических построениях, и оно так не вошло в практику проектирования.

Литература

1. Тимухина Е. Н. Автоматизированная экспертиза — инструмент при оценке безопасности транспортных процессов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 73–77. ISSN 1815-9400.
2. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 59–62. ISSN 1815-9400.
3. Козлов П. А., Владимирская И. П. Закономерности преобразования потока в транспортных структурах // Транспорт Урала. 2009. № 1 (20). С. 37–39. ISSN 1815-9400.
4. Проектирование железнодорожных станций и узлов : справ. и метод. руководство. М. : Транспорт, 1981. 1044 с.

References

1. Timukhina E. N. Avtomatizirovannaya ekspertiza — instrument pri otsenke bezopasnosti transportnykh protsessov [Automated examination — a tool to evaluate of safety of transport processes] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 73–77. ISSN 1815-9400.
2. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh [Research methodology to study functional capability of stations in case of process failures] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (31). P. 59–62. ISSN 1815-9400.
3. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Zakonomernosti preobrazovaniya potoka v transportnykh strukturakh [Laws of flow transformation in transport structures] // Transport of the Urals. 2009. № 1 (20). P. 37–39. ISSN 1815-9400.
4. Proektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov : sprav. i metod. rukovodstvo [Designing railway stations and junctions : a reference manual and guidance]. M. : Transport, 1981. 1044 p.

УДК 658.2.022.846

Вера Алексеевна Алпысова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС),
Николай Сергеевич Бушуев, кандидат технических наук, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС),
Дарина Олеговна Миненко, ассистент кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ НА ПРИМЕРЕ ПОЕЗДОВ «САПСАН» НАПРАВЛЕНИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ — МОСКВА

Vera Alexeyevna Alpysova, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Location Survey and Railway Design, Petersburg State Transport University (PSTU),
Nikolay Sergeyevich Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Location Survey and Railway Design, Petersburg State Transport University (PSTU),
Darina Olegovna Minenko, Assistant Lecturer, Department of Location Survey and Railway Design, Petersburg State Transport University (PSTU)

Modeling and forecasting high-speed route passenger traffic on the example of Sapsan trains on the route Petersburg — Moscow

Аннотация

В статье представлен прогноз величины пассажиропотока поездов «Сапсан» на направлении Санкт-Петербург — Москва до 2023 г., позволяющий оценить возможность использования высокоскоростных поездов на существующей линии и наметить перспективы сооружения новой высокоскоростной магистрали. Применяемые в работе расчетные модели учитывают влияние на прирост пассажиропотока поездов «Сапсан» таких показателей, как численность населения, величина валового регионального продукта и движение «туристической массы».

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, железнодорожное направление Санкт-Петербург — Москва, авиатранспорт, пассажиропоток, численность населения, валовой региональный продукт, «туристическая масса», прогноз.

Summary

The article presents a forecast of the passenger traffic on Sapsan trains between St. Petersburg — Moscow until 2023, allowing to evaluate the possibility to use high-speed trains on the existing line and outline the prospects for building a new high-speed line. The simulation models employed take into account the effect of such indicators as population, gross regional product and tourism traffic on the growth of Sapsan train passenger traffic.

Keywords: high-speed line, railway line St. Petersburg — Moscow, air transport, passenger traffic, population, gross regional product, «tourist mass», forecast.

ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2009 г. на линии Санкт-Петербург — Москва начал курсировать высокоскоростной поезд «Сапсан», максимальная скорость которого на участке между станциями Окуловка и Малая Вишера достигает 250 км/ч, а минимальное время в пути составляет 3 ч 45 мин. Это приблизительно на 1 ч меньше времени в пути скорого дневного поезда «Невский экспресс» и на 1,5 ч меньше времени следования на самолете с учетом среднего дополнительного времени, затрачиваемого пассажиром на перемещение из центра одного города в центр другого [1]. Несмотря на примерно одинаковую среднюю стоимость проездных билетов на поезд «Сапсан» по сравнению с самолетом, ночным поездом (купе) или дневным скорым поездом, на данном направлении за последние 3 года наблюдаются некоторые тенденции в изменении и перераспределении пассажиропотока между различными видами транспорта (рис. 1). Очевидный интерес представляют причины и закономерности таких изменений, а также вопросы прогнозирования пассажиропотока высокоскоростной магистрали (ВСМ) на перспективу.

1. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА И ПРОГНОЗ ДО 2023 Г. (НА 10 ЛЕТ)

Рассмотрим три наиболее популярных вида транспорта на направлении Санкт-Петербург — Москва. Обозначим пассажиропоток по каждому из них следующим образом. Пусть Π — общий пассажиропоток (тыс. пасс./год), который, в свою очередь,

состоит из P_1 , P_2 , P_3 , где P_1 — количество пассажиров, перевезенных ночными поездами («Красная стрела», «Смена», «Две столицы» и др.) и скорыми дневными сидячими поездами («Невский экспресс», «Аврора»); P_2 — пассажиропоток высокоскоростных дневных поездов «Сапсан» [2]; P_3 — количество пассажиров, пользующихся услугами пяти авиакомпаний, которые на сегодняшний день осуществляют перевозку на данном направлении («Аэрофлот», «Россия», «Трансаэро», S7, Utair) [2].

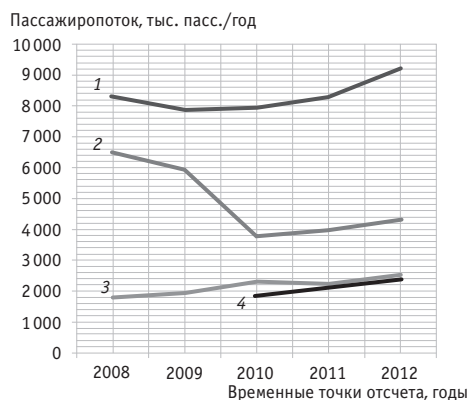


Рис. 1. Пассажиропоток (туда + обратно) на направлении Санкт-Петербург — Москва [2, 3]:

1 — общий пассажиропоток; 2 — ночные и скорые дневные поезда; 3 — авиатранспорт; 4 — высокоскоростной поезд «Сапсан»

Из рис. 1 видно, что поезда «Сапсан» в первые годы эксплуатации привлекли значительную часть пассажиропотока, снизив объем авиаперевозок. В 2010 г. по отношению к 2009-му пассажиропоток P_1 уменьшился на 36,2% [2], а в 2011 г. по отношению к 2010-му количество пассажиров на авиасообщении P_3 снизилось на 2,6% [2]. Количество «Сапсанов» до 6–7 пар в сутки было увеличено уже к маю 2011 г. Снижение общего объема пассажиропотока в 2009 г., очевидно, объясняется влиянием экономического кризиса 2008 г.

В 2012 г. авиация вернула себе пассажиров, в частности, за счет того, что некоторые компании предоставили возможность приобретать дешевые билеты и увеличили частоту рейсов [3].

За период с 2010 по 2012 г. по всем рассматриваемым видам транспорта наблюдался прирост пассажиропотока. Проанализируем эту тенденцию для условия, что линейность изменения пассажиропотока с 2010 по 2012 г. сохранится и на перспективу до 2023 г. (табл. 1).

Предположим, что средняя вместимость одного поезда «Сапсан» составляет 554 чел. [2]. Тогда для освоения пассажиропотока 2023 г., превышающего 6 млн чел. (см. табл. 1), потребуется 16 пар поездов «Сапсан» или 8 пар сдвоенных «Сапсанов».

Введение 16 пар поездов «Сапсан», т.е. 9 дополнительных пар, чрезвычайно негативно скажется на качестве транспортных услуг для населения, пользующегося пригородными поездами. Еще более стесненными окажутся и местные грузовые перевозки. Проведение ремонтно-восстановительных работ в дневное время без больших потерь станет практически невозможным.

Альтернативой примерно на десятилетний период, которая позволит и сохранить пассажиропоток по железной дороге, и отсрочить сооружение новой выделенной ВСМ Санкт-Петербург — Москва, может стать только введение сдвоенных поездов [4], что практически в полном объеме даст возможность сохранить существующие размеры движения пригородных пассажирских и местных грузовых поездов.

За пределами десятилетнего периода сооружение новой ВСМ для скоростей до 300–400 км/ч станет практически неизбежным. В противном случае железная дорога начнет терять потенциальных пассажиров в пользу авиатранспорта, поскольку пропускная способность высокоскоростных поездов на существующем направлении Санкт-Петербург — Бологое — Москва будет полностью исчерпана.

2. ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ПРИРОСТ ПАССАЖИРОПОТОКА, ОСВАИВАЕМОГО ПОЕЗДАМИ «САПСАН»

Известно, что на размер и характер изменения пассажиропотока влияет несколько социально-экономических факторов (например, благосостояние населения, тарифная политика, качество транспортной услуги и т.п.), которые во многом зависят от сложившейся в стране экономической и политической ситуации.

Состояние экономики в значительной степени характеризуется такими показателями, как валовой внутренний продукт (ВВП), валовой региональный продукт (ВРП), численность населения, прирост рождаемости и т.д. Показателями благосостояния населения являются реальные располагаемые доходы, подвижность или мобильность населения, движение так называемой «туристической массы» и др.

В качестве примера влияния на пассажиропоток, осваиваемый поездами «Сапсан» на направлении Санкт-Петербург — Москва, из числа вышеперечисленных факторов были рассмотрены три (рис. 2):

Таблица 1

Тенденции роста пассажиропотока на направлении Санкт-Петербург — Москва в период с 2010 по 2023 г.

| Обозначение основных видов транспорта | Величина пассажиропотока, тыс. пасс./год | | Средний прирост пассажиропотока, тыс. пасс./год | Прогноз пассажиропотока, тыс. пасс./год | | Доля основных видов транспорта (P_1 , P_2 , P_3) в общем пассажиропотоке П | | | |
|---------------------------------------|--|---------|---|---|---------|--|---------|---------|---------|
| | 2010 г. | 2012 г. | | 2013 г. | 2023 г. | 2010 г. | 2012 г. | 2013 г. | 2023 г. |
| P_1 | 3794,65 | 4298,93 | 252,142 | 4551,07 | 6751,63 | 0,477 | 0,469 | 0,465 | 0,425 |
| P_2 | 1860,00 | 2375,96 | 257,978 | 2633,94 | 6306,82 | 0,234 | 0,259 | 0,269 | 0,397 |
| P_3 | 2300,00 | 2500,00 | 100,000 | 2600,00 | 2827,74 | 0,289 | 0,272 | 0,266 | 0,178 |
| П | 7954,65 | 9174,89 | 610,119 | 9785,01 | 15886,2 | 1 | 1 | 1 | 1 |

численность населения Санкт-Петербурга и Москвы [5];
величина ВРП Санкт-Петербурга и Москвы [5];
движение «туристической массы» в направлении Санкт-Петербург — Москва и обратно [6].



Рис. 2. Изменение показателей численности населения, величины ВРП и движения «туристической массы» на направлении Санкт-Петербург — Москва:

- 1 — численность населения Санкт-Петербурга и Москвы, тыс. чел.;
2 — ВРП Санкт-Петербурга и Москвы, млрд руб.;
3 — движение «туристической массы», тыс. чел.;
4 — пассажиропоток поезда «Сапсан», тыс. чел.

Для того чтобы выявить наличие статистических взаимосвязей между рассматриваемыми факторами и величиной пассажиропотока поездов «Сапсан» на направлении Санкт-Петербург — Москва, в программе MS Excel были определены коэффициенты корреляции, которые сведены в корреляционную матрицу (табл. 2).

Полученные коэффициенты корреляционной зависимости указывают на высокую степень прямой линейной связи (по шкале Чеддока) [7] между величиной пассажиропотока поездов «Сапсан» и такими показателями, как численность населения, ВРП, движение «туристической массы». Для уточнения уравнения регрессии необходимо провести дополнительный сбор информации по принятым факторам влияния.

С использованием данных за 2010 и 2012 гг. (см. табл. 1) в табл. 3 приведены доли пассажиропотока поездов «Сапсан» в величине каждого из трех факторов, а также численные значения самих факторов влияния на 2013 и 2023 гг. Расчеты выполнены в двух вариантах: с учетом линейного роста показателей и с учетом их постоянного среднего ежегодного процента роста. Результаты прогноза пассажиропотока, представляющие собой произведения соответствующей доли на величину фактора влияния, сведены в табл. 4.

Таблица 2

Корреляционная матрица

| | Пассажиропоток поездов «Сапсан» | Численность населения | ВРП | Движение «туристической массы» |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------|--------------------------------|
| Пассажиропоток поездов «Сапсан» | 1 | | | |
| Численность населения | 0,876985353 | 1 | | |
| ВРП | 0,911728152 | 0,996965819 | 1 | |
| Движение «туристической массы» | 0,971729262 | 0,965641433 | 0,982940564 | 1 |

Таблица 3

Доля пассажиропотока поездов «Сапсан» в зависимости от численности населения, величины ВРП и движения «туристической массы» на 2013 и 2023 гг.

| Фактор влияния | Величина показателя | | С учетом линейного роста доли пассажиропотока поездов «Сапсан» и рассматриваемого фактора* | | С учетом постоянного среднего ежегодного процента роста доли пассажиропотока поездов «Сапсан» и рассматриваемого фактора* | |
|---|---------------------|------------|--|--------------------|---|--------------------|
| | на 2010 г. | на 2012 г. | на 2013 г. | на 2023 г. | на 2013 г. | на 2023 г. |
| Численность населения, тыс. чел. | 15365,0 | 16566,0 | 0,154/17166,5 | 0,264/23171,5 | 0,156/17201,3 | 0,358/25060,26 |
| ВРП, млрд руб. | 10075,0 | 12469,0 | 0,000581**/13666,0 | 0,000671**/25636,0 | 0,000581**/13871,5 | 0,000682**/40277,1 |
| Движение «туристической массы», тыс. чел. | 6575,2 | 8068,6 | 0,3003/8815,3 | 0,3583/16282,3 | 0,3005/8938,1 | 0,3673/24870,8 |

* В числителе — доля пассажиропотока поездов «Сапсан», в знаменателе — величина фактора.

** Доля пассажиропотока в показателе ВРП рассчитана путем перевода численности пассажиров в доход от приобретения билетов с учетом стоимости мест экономкласса (3000 руб.) в ценах на ноябрь 2013 г. [2].

Таблица 4

Прогноз пассажиропотока поездов «Сапсан» на 2013 и 2023 гг., тыс. чел.

| Фактор влияния | С учетом линейного роста доли пассажиропотока поездов «Сапсан» и рассматриваемого фактора | | С учетом постоянного среднего ежегодного процента роста доли пассажиропотока поездов «Сапсан» и рассматриваемого фактора | |
|--------------------------------|---|------------|--|------------|
| | на 2013 г. | на 2023 г. | на 2013 г. | на 2023 г. |
| Численность населения | 2643,641 | 6117,276 | 2683,403 | 8971,573 |
| ВРП | 2646,649 | 5733,919 | 2686,477 | 9156,327 |
| Движение «туристической массы» | 2647,235 | 5833,948 | 2685,899 | 9135,045 |

Сегодня движение поездов с высокими скоростями на рассматриваемом направлении имеет и положительные, и отрицательные стороны. К первым относится достаточно быстрый темп роста пассажиропотока, наблюдаемый за три года, и высокие показатели спроса на этот вид транспорта. Но, к сожалению, существующая инфраструктура постоянно нуждается в значительных средствах на восстановление железнодорожного пути. Транспортные компании осуществляют перевозку грузов по маршрутам, увеличенным на сотни километров [8], а жители областей, расположенных между двумя столицами, из-за отмены части дневных электричек вынуждены испытывать неудобства передвижения на данном направлении.

Поскольку пассажиропоток между Санкт-Петербургом и Москвой будет расти и впредь, сложную транспортную проблему этого направления необходимо решать комплексно: и с учетом целого ряда потребностей населения (минимальное время в пути следования, экономически доступный тариф на проездной билет, удобство расписания и др.), и с учетом интересов железнодорожного транспорта, конкуренция которого с авиационным будет только усиливаться.

Величина и более точная оценка перспективы роста общего пассажиропотока на направлении и по видам транспорта, а также пассажиропотока, осваиваемого скоростными и высокоскоростными поездами, позволяют принимать обоснованные решения по этапному увеличению мощности существующей железной дороги, а также определять сроки и целесообразность сооружения новой ВСМ. Это объясняется, с одной стороны, прямой зависимостью доходной денежной составляющей проекта от пассажиропотока, а с другой — необходимостью резервирования определенной пропускной способности для обеспечения пассажирских перевозок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средние прогнозные значения пассажиропотока высокоскоростных поездов «Сапсан», смоделированные различными способами с учетом прироста численности населения, вели-

чины ВРП и движения «туристической массы» между Санкт-Петербургом и Москвой, варьируются в следующем диапазоне. С учетом линейного роста доли пассажиропотока поездов «Сапсан» в величине того или иного фактора и самого рассматриваемого фактора прогноз величины Π_2 изменяется в интервале от 2634 до 2647 тыс. чел. на 2013 г. и от 5734 до 6307 тыс. чел. на 2023 г. С учетом постоянного среднего ежегодного процента роста доли как пассажиропотока поездов «Сапсан» в величине того или иного фактора, так и самого рассматриваемого фактора величина Π_2 может составить от 2683 до 2687 тыс. чел. на 2013 г. и от 8972 до 9156 тыс. чел. на 2023 г.

Из зарубежного опыта известно, что экономически эффективными показателями для сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали являются величина суммарного устойчивого пассажиропотока 10–11 млн чел./год и населенность агломерации, тяготеющей к ВСМ, 20–25 млн чел. [9]. В России таким перспективным направлением является Санкт-Петербург — Москва, что подтверждают приведенные выше расчеты по прогнозу пассажиропотока на 2023 г.

Кроме направления Санкт-Петербург — Москва, в Российской Федерации нет опыта эксплуатации поездов со скоростями свыше 200 км/ч.

В связи с этим данные о перераспределении пассажиропотока между основными конкурирующими видами транспорта при дальности перевозок от 200 до 800 км, полученные при введении высокоскоростных поездов на направлении Санкт-Петербург — Москва, могут быть распространены с последующим уточнением и корректировкой на другие направления, также перспективные для организации высокоскоростного движения. В настоящее время к таким относятся направления Москва — Казань — Екатеринбург, Москва — юг и ряд других.

При накоплении статистических данных о пассажиропотоке на каком-либо новом направлении, осваиваемом высокоскоростными поездами, подход к определению его прогнозных величин может быть аналогичным предложенному в настоящей статье.

Литература

1. Бушуев Н. С., Миненко Д. О. Оценка востребованности высокоскоростной железнодорожной магистрали на полигоне Санкт-Петербург — Москва // Известия ПГУПС. 2013. Вып. 2 (35). С. 5–11. ISSN 1815-588X.
2. Данные ОАО «РЖД» и ОАО «Аэропорт Пулково» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pulkovoairport.ru> (дата обращения: 10.11.2013).
3. Воздушный транспорт и скоростные железные дороги: поле неслучившейся битвы [Электронный ресурс] // Деловой авиационный портал. 2013. 5 июня. URL: <http://www.ato.ru> (дата обращения: 14.11.2013).
4. Коновалова Н. «Сапсанов» станет вдвое больше // Санкт-Петербургские ведомости. 2011. 26 дек.
5. Данные Федеральной службы государственной статистики России (Росстат) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sks.ru> (дата обращения: 12.11.2013).
6. Данные Федерального агентства по туризму (Ростуризм) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.russiaturism.ru> (дата обращения: 12.11.2013).
7. Еськова О. И., Авдашкова Л. П., Грибовская М. А. Основы статистической обработки информации: пособие. Минск: Беларусь, 2011. 175 с.
8. «Сапсан» в тупике // Ведомости — Санкт-Петербургский выпуск. 2011. 13 дек.
9. Киселев И. П. Для высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург — Москва есть все условия, но нет политической воли // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 1–2. С. 48–51. ISSN 0236-1914.

References

1. Bushuev N. S., Minenko D. O. Otsenka vostrebovanosti vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali na poligone Sankt-Peterburg — Moskva [Evaluation of demand high-speed rail line at the range St. Petersburg — Moscow] // Izvestiya PGUPS. 2013. Vyp. 2 (35). P. 5–11. ISSN 1815-588X.
2. Dannye OAO «RZhD» i OAO «Aeroport Pulkovo» [Data of JSC Russian Railways and JSC Pulkovo Airport]. [Electronic resource]. URL: <http://www.pulkovoairport.ru> (date accessed: 10.11.2013).
3. Vozdushnyy transport i skorostnye zheleznnye dorogi: pole nesluchivsheysya bitvy [Air transport and high-speed railways: the field of the battle that never happened]. [Electronic resource] // Delovoy aviatsionnyy portal. 2013. 5 iyunya. URL: <http://www.ato.ru> (date accessed: 14.11.2013).
4. Konovalova N. «Sapsanov» stanet vdvoe bolshe [Sapsan trains will double] // Sankt-Peterburgskie vedomosti. 2011. 26 dek.
5. Dannye Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy statistiki Rossii (Rosstat) [Data of the Federal Service of State Statistics of Russia (Rosstat)]. [Electronic resource]. URL: <http://www.sks.ru> (date accessed: 12.11.2013).
6. Dannye Federalnogo agentstva po turizmu (Rosturizm) [Data of the Federal Agency for Tourism (Rosturizm)]. [Electronic resource]. URL: <http://www.russiaturism.ru> (date accessed: 12.11.2013).
7. Eskova O. I., Avdashkova L. P., Gribovskaya M. A. Osnovy statisticheskoy obrabotki informatsii: posobie [Fundamentals of statistical information processing: a handbook]. Minsk: Belarus, 2011. 175 p.
8. «Sapsan» v tupike [Sapsan train in a deadlock] // Vedomosti — Sankt-Peterburgskiy vypusk. 2011. 13 dek.
9. Kiselev I. P. Dlya vysokoskorostnoy magistrali Sankt-Peterburg — Moskva est vse usloviya, no net politicheskoy voli [There are all conditions for the high-speed line St. Petersburg — Moscow, but there is no political will] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2013. № 1–2. P. 48–51. ISSN 0236-1914.

УДК 656.212.5

Игорь Александрович Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Виталий Сергеевич Колокольников, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Igor Alexandrovich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Vitaliy Sergeyevich Kolokolnikov, Assistant Lecturer, Department of Operations Management, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Effect of equipment failure on fulfillment of train schedule

Аннотация

Ненадлежащее содержание технических средств является причиной их постоянных отказов и соответственно нарушения графика движения поездов. В статье приведена статистика отказов, подробно рассмотрены сбои движения, возникающие в результате отказов локомотивов в пути следования, проанализирована последовательность действий, выполняемых при устранении отказа и его последствий. Показано, что проблемой является не только сам отказ, но и последствия, которые он вызывает.

Ключевые слова: технические средства железных дорог, отказы, график движения поездов.

Summary

Improper equipment maintenance is the cause of their constant failures, and consequently, violation of train schedule. The article provides failure statistics, considering in detail schedule violations resulting from locomotives failures on the route, analyzes the sequence of actions performed while eliminating failure and its consequences. It is shown that the problem lies not only in the failure itself, but also in the effects that it causes.

Keywords: railway equipment, failures, train schedule.

Цель работы заключается в изучении причин и структурировании последствий, вызванных отказами локомотивов, возникающими при обслуживании однопутного участка.

Одним из основных технических средств, которые обеспечивают работу железных дорог, являются поездные локомотивы [1]. Сегодня значительная их часть выработала свой ресурс и нуждается в обновлении. Ситуация осложняется несвоевременным обслуживанием и некачественным ремонтом локомотивного парка, вследствие чего происходят отказы. Они приводят к сбоям в графике движения поездов, что особенно сильно сказывается на работе однопутных участков. На рис. 1 представлена статистика отказов технических средств, полученная из системы «КАСАНТ», за семь месяцев 2012–2013 гг. на одном из однопутных железнодорожных участков с тепловозной тягой протяженностью порядка 600 км. Как видно из рис. 1, отказы, возникающие в результате неисправности локомотивов, являются наиболее негативным фактором (более половины всех отказов, происходящих за месяц), влияющим на работу участка.

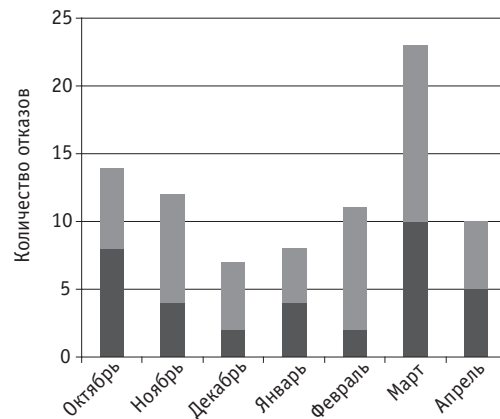


Рис. 1. Статистика отказов технических средств:

■ — локомотивы; ■ — другие технические средства

По представленным данным для каждого месяца определена статистическая вероятность отказа из-за неисправности локомотивов: отношение количества суток, в которые произошел отказ, к количеству суток в рассматриваемом периоде (месяц). Результаты показали, что значение статистической вероятности изменяется от 13 % в январе до 43 % в марте. С одной стороны, высокий уровень отказов (март), выраженный в процентном отношении, свидетельствует о частых нештатных ситуациях. С другой стороны, если рассмотреть статистику в количественном выражении, то можно увидеть, что вероятность возникновения отказа на первый взгляд не очень велика и составляет один раз в восемь дней в январе и один раз в 2–3 дня в марте. Однако при такой статистике отказов диспетчерский аппарат практически на про-

тяжении всего месяца вынужден работать в условиях дефицита локомотивного парка, не соблюдая график движения поездов.

Для того чтобы понять, почему это происходит, необходимо представить, какие последствия возникают при отказе локомотива и сколько времени требуется на их устранение. Отказ локомотива на однопутном перегоне блокирует движение поездов на всем участке, в то же время освобождение перегона не означает нормализацию ситуации. Восстановление движения и введение поездов в график может занять достаточно продолжительное время [2].

Последовательность выполнения технологических операций при отказе поездного локомотива представлена в виде алгоритма на рис. 2.

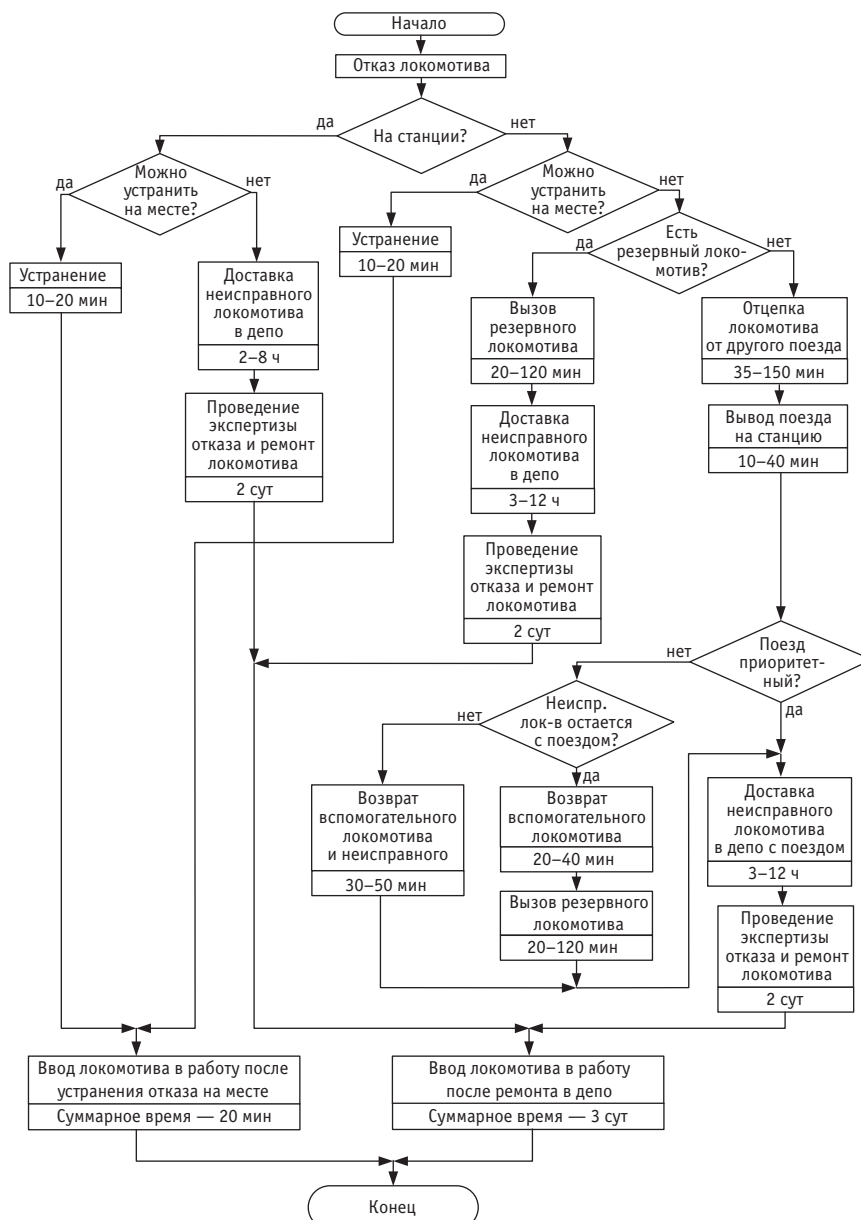


Рис. 2. Последовательность выполнения технологических операций при отказе поездного локомотива

В качестве примера рассмотрим ситуацию поломки локомотива, следующего с поездом, на перегоне однопутного участка, оборудованного полуавтоматической блокировкой. После остановки поезда локомотивной бригаде необходимо выявить причину неисправности и по возможности ее устранить. В случае невозможности вести поезд дальше машинист закрепляет состав и докладывает поездному диспетчеру. Движение на перегоне блокируется, а на участке происходит стягивание поездов, находящихся на момент отказа в движении, к станциям, расположенным поблизости от заблокированного перегона. Остановленные таким образом поезда вынужденно занимают пути станций, тем самым затрудняя на них выполнение маневровой работы.

Диспетчер, оценив ситуацию, определяет, от какого поезда будет задействован вспомогательный локомотив. При этом отцепляемый локомотив должен обеспечивать требуемую силу тяги, локомотивная бригада — необходимый режим для ведения поезда до станции с локомотивным депо или пунктом смены локомотивных бригад. Состав, от которого отцепляется локомотив для оказания помощи, остается на неопределенное время на станции с достаточной для его размещения длиной приемо-отправочных путей.

Отцепленный локомотив следует к остановившемуся поезду, объединяется с ним, после проверки автотормозов и уборки средств закрепления выводит поезд на ближайшую станцию.

Последовательность выполнения действий по выводу поезда с перегона можно представить во времени в виде следующих элементов (рис. 3):

поиск неисправности в остановившемся поезде локомотивной бригадой — 10 мин по регламенту;

запрос вспомогательного локомотива машинистом, выбор диспетчером поезда, от которого будет использован локомотив, подход данного поезда к станции отцепки — от 10 мин до 1,5 ч в зависимости от местонахождения вспомогательного локомотива;

закрепление поезда, от которого будет отцеплен вспомогательный локомотив, отцепка локомотива, получение приказа на следование на занятый перегон — от 15 до 30 мин;

следование вспомогательного локомотива к месту остановки поезда на перегоне — от 10 до 30 мин;

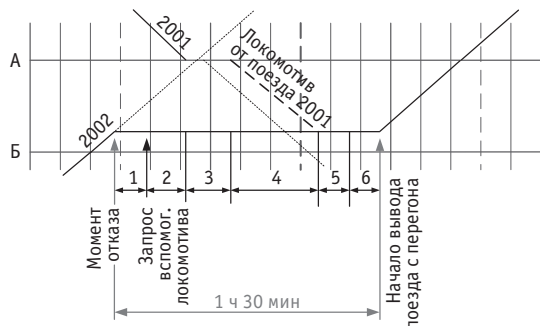


Рис. 3. Последовательность выполнения действий по выводу поезда с перегона:

- 1 — поиск отказа; 2 — подход поезда с вспомогательным локомотивом;
- 3 — закрепление поезда, отцепка локомотива; 4 — следование вспомогательного локомотива к месту остановки поезда;
- 5 — опробование тормозов; 6 — уборка тормозных башмаков

объединение вспомогательного локомотива с поездом, опробование тормозов, уборка средств закрепления, отправление поезда, остановившегося на перегоне, — 20 мин.

Как показывает опыт, на оказание помощи поезду, остановившемуся на перегоне, затрачивается от 1,5 до 3 ч. Поскольку участок однопутный, другие поезда в течение всего этого времени не могут быть отправлены, а после освобождения перегона будут длительное время вводиться в график.

Далее неисправный локомотив доставляется в локомотивное депо — для проведения экспертизы и выполнения ремонтных работ. Возможен вариант, при котором вспомогательный локомотив, выведя поезд на ближайшую станцию, вместе с неисправным локомотивом будет возвращен к поезду, с которым следовал ранее. Это может быть сделано для того, чтобы быстрее доставить неисправный локомотив к месту его ремонта — в основное депо. В таких случаях диспетчер принимает решение, исходя из сложившейся ситуации (режим работы локомотивной бригады, удаленность от депо, пассажирский поезд и т.д.).

Как видно из рис. 4, на котором представлена последовательность проведения действий по вводу неисправного локомотива в работу, общая продолжительность всех мероприятий может составлять от 2 до 3 сут:

оказание помощи — от 1,5 до 3 ч;

доставка неисправного локомотива в депо — в среднем от 8 до 10 ч;

экспертиза и устранение неисправности — 2 сут.

На протяжении этого времени поездная работа на участке выполняется в условиях дефицита локомотивов, что приводит к срыву графика движения. Сформированные поезда своевременно не выводятся со станций и занимают пути, затрудняется выполнение маневровой работы, замедляется обслуживание предприятий, примыкающих к станциям [3].

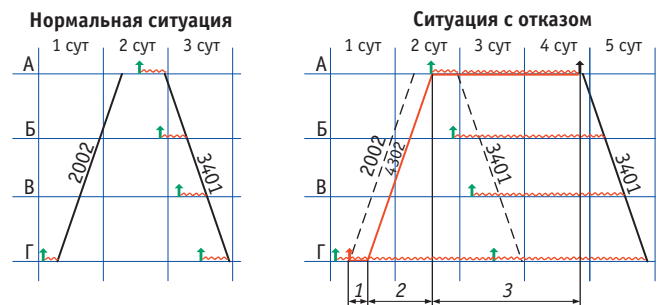


Рис. 4. Последовательность выполнения действий по вводу неисправного локомотива в работу:

- ↑ — моменты готовности состава к отправлению; ↑ — момент отказа локомотива; ↑ — момент ввода локомотива в работу; — простой состава в ожидании отправления; 1 — оказание помощи;
- 2 — следование неисправного локомотива в депо; 3 — проведение экспертизы неисправности и ремонт локомотива

На рассматриваемом участке локомотив, не эксплуатирувавшийся 2 сут, приводит в среднем к задержкам по отправлению трех составов. Составы, не обеспеченные локомотивами, будут «брошены» на участке, что вызовет нехватку путей для скрещения и обгона. Длительное отсутствие локомотива в работе повлечет за собой нарушение движения на всем участке.

На рис. 5 представлен график движения поездов, цветными областями выделены отклонения поездов от нормативных ниток в результате недостаточного количества локомотивов. Суммарное отклонение времени следования поездов от нормативного графика в рассмотренном случае составляет 28 ч в сутки.

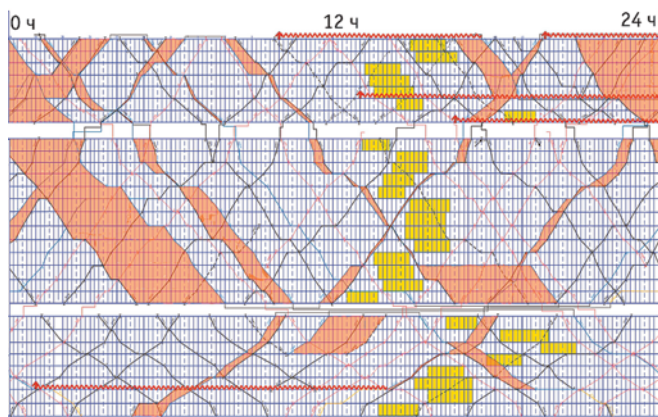


Рис. 5. График движения поездов

По данным статистики, из-за неисправности локомотива, исключенного из работы на 2 сут, поезда могут быть введены в график через 1–2 сут после его выхода из депо. Как видно из рис. 1, в связи с отказами локомотивов в январе участок в течение 8 сут функционировал с нарушением графика движения поездов (без учета неисправностей, произошедших

по другим причинам), а в марте график не выполнялся практически весь месяц.

В целом если на отдельном участке регулярно в течение месяца не соблюдается график движения, то это неизбежно приводит к снижению показателей работы. Как показывает анализ, за рассмотренный период по причине отказов технических устройств значение участковой скорости падает с 44 до 36 км/ч. Задержки поездов по отправлению возрастают вдвое, замедляется процесс накопления, что приводит к снижению количества сформированных, отправленных и сданных поездов, увеличению времени доставки грузов и возникновению штрафов.

Из-за невыполнения графика движения поездов управление на участке осуществляется на основании личного опыта диспетчера, без применения средств автоматизации. В связи с этим прокладывание ниток выполняется нерационально, что увеличивает время ввода поездов в график и снижает показатели работы. Создание автоматизированной системы расчета прогнозного графика движения поездов, которая основывается на подходе, изложенном в [4], позволит облегчить работу диспетчера, а также улучшить показатели работы региона управления и в целом железной дороги.

Рассмотренные в настоящей статье отказы локомотивов и их последствия представляют значительную проблему для железных дорог [5, 6]. Величину требуемых резервов на случай отказа необходимо обосновывать расчетами. Поэтому для дальнейшего изучения данной проблемы целесообразно создание имитационной модели и проведение на ней расчетных экспериментов.

Литература

1. Некрашевич В. И. Использование поездных локомотивов в грузовом движении. Гомель : БелГУТ, 2001. 270 с.
2. Некрашевич В. И., Апатцев В. И. Управление эксплуатационной работой локомотивов : учеб. пособие. М. : РГОТУПС, 2000. 194 с.
3. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 58–62. ISSN 1815-9400.
4. Александров А. Э., Шипулин А. В. Автоматизация построения прогнозного графика движения поездов // Вестник УрГУПС. 2013. № 3 (19). С. 34–44. ISSN 2079-0392.
5. Тимухина Е. Н. Функциональная надежность в элементарных и системных процессах // Транспорт : наука, техника, управление. 2012. № 3. С. 52–57. ISSN 0236-1914.
6. Тимухина Е. Н., Касеева Н. В. Повышение функциональных и адаптивных свойств железнодорожных станций : монография. Palmarium Academic Publishing, 2013. 210 с.

References

1. Nekrashevich V. I. Ispolzovanie poezdnykh lokomotivov v gruzovom dvizhenii [Use of train locomotives in freight traffic]. Gomel : BelGUT, 2001. 270 p.
2. Nekrashevich V. I., Apattsev V. I. Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy lokomotivov : ucheb. posobie [Locomotive operations management : a textbook]. M. : RGOTUPS, 2000. 194 p.
3. Timukhina E. N. Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboyakh [Research methodology to study functional capability of stations in case of process failures] // Transport of the Urals. 2011. № 4 (31). P. 58–62. ISSN 1815-9400.
4. Aleksandrov A. E., Shipulin A. V. Avtomatizatsiya postroyeniya prognoznogo grafika dvizheniya poezdov [Automation of building predictive traffic schedule] // Herald of USURT. 2013. № 3 (19). P. 34–44. ISSN 2079-0392.
5. Timukhina E. N. Funktsionalnaya nadezhnost v elementarnykh i sistemnykh protsessakh [Functional safety in elementary and system processes] // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2012. № 3. P. 52–57. ISSN 0236-1914.
6. Timukhina E. N., Kasheeva N. V. Povyshenie funktsionalnykh i adaptivnykh svoystv zheleznodorozhnykh stantsiy : monografiya [Increasing functional and adaptive properties of railway stations : a monograph]. Palmarium Academic Publishing, 2013. 210 p.

УДК.625.113

Инна Леонидовна Парахненко, аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Сергей Геннадьевич Аккерман, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИЕМ В КОНТАКТЕ «КОЛЕСО — РЕЛЬС»

Inna Leonidovna Parakhnenko, graduate student, Department of Railway Construction and Railway Track, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Sergey Gennadyevich Akkerman, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Railway Construction and Railway Track, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Friction control effectiveness in «wheel — rail» contact

Аннотация

С ростом грузовых и пассажирских перевозок управление трением стало играть важную роль в снижении износа колеса и рельса. Основной способ управлять трением — использовать лубрикацию для снижения коэффициента трения. Эффективные технологии лубрикации рельсов позволяют улучшить взаимодействие и уменьшить износ в системе «колесо — рельс», повысить безопасность и сократить расходы на содержание пути и подвижного состава. Однако отсутствие мониторинга рельсосмазывания снижает эффект применения лубрикации, так как не обеспечивается достаточный контроль за наличием смазочного материала на рельсе.

Ключевые слова: коэффициент трения, рельсосмазыватель, лубрикация, рельс, трибометр.

Summary

With the growth of freight and passenger traffic, friction control began to play an important role in reducing the wear of wheel and rail. The main way to control friction is to use lubrication to reduce the friction coefficient. Effective rail lubrication technology allow to improve communication and reduce wear in the «wheel — rail» system, enhancing safety and reducing costs of track and rolling stock maintenance. However, the lack of rail lubrication monitoring reduces lubrication effect, as sufficient control of the presence of lubricant on the rail is not provided.

Keywords: friction, rail lubricant, lubrication, rail, tribometer.

С каждым годом скорости, массы грузовых поездов, погонная и осевая нагрузки вагонов и локомотивов растут. Соответственно увеличивается нагрузка на рельсы, что ведет к заметному сокращению срока их службы. В связи с этим необходимость создания оптимального контакта между колесом и рельсом становится особенно актуальной задачей. Баланс в системе «колесо — рельс» может быть достигнут только за счет инженерного анализа данной проблемы и применения новых технологий управления трением по дорожке катания. Причем цель управления трением состоит не просто в снижении, а в получении определенного коэффициента трения в конкретных зонах колеса или рельса.

Одним из способов управлять трением является введение в зону контакта колеса и рельса для снижения коэффициента трения третьего тела — лубриканта. Традиционно лубрикацию применяют для боковой поверхности рельса и гребня колеса, чтобы поддержать в зоне контакта «колесо — рельс» оптимизирующие значения коэффициента трения: на боковой поверхности головки рельса — менее 0,20, на поверхности катания — от 0,30 до 0,40 [1]. При этом трение снижается на боковой грани наружного рельса, имеющего возвышение, но внутренний рельс подвергается уплощению головки и волнообразному износу. Кроме того, введение лубриканта в кривых участках пути не решает проблемы влияния на прямых участках.

Что касается технико-экономического эффекта от применения лубрикации рельсов, то он выражается:

в снижении износа боковой поверхности головки рельсов и гребней колес;

сокращении расхода топлива или электроэнергии за счет улучшения взаимодействия колеса и рельса;

уменьшении шума.

Оптимальной считается лубрикация, которая удовлетворяет всем перечисленным параметрам и не создает отрицательных эффектов воздействия на тяговые характеристики поезда и движение экипажа в кривых.

Как показывает эксплуатационная практика на российских и зарубежных железных дорогах, лубрикация уменьшает износ колес и рельсов на 15–80 % и повышает их ресурс. Однако отсутствие эффективных систем мониторинга рельсосмазывания снижает эффект применения лубрикации, так как не обеспечивается необходимый контроль за наличием смазочного материала на боковой поверхности головки рельсов. Вследствие этого ресурс рельсов в кривых участках пути не достигает рекомендуемых 0,5 млрд тк·м брутто, соответственно расходы по замене изношенных рельсов и текущему содержанию пути остаются весьма существенными.

Кафедрой «Путь и железнодорожное строительство» УрГУПС совместно со Свердловской железной дорогой впервые было проведено исследование с целью измерения ресурса используемой смазки. Согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 20.01.2012 № 81р [2], смазка для лубрикации рельсов на перегонах должна иметь ресурс не менее 19 тыс. осей при осевой нагрузке грузовых вагонов $\geq 23,5$ т в кривых радиусом 400 м при движении грузового поезда со скоростью, соответствующей непогашенному ускорению $-0,3 \text{ м/с} \leq a_{\text{нп}} \leq 0,3 \text{ м/с}$, и удельном расходе не более 300 г/км.

В качестве исходных данных для нормирования расхода были приняты: план и профиль пути, характеристики пути в кривой, расчетное значение технической скорости движения грузовых поездов, режим ведения поезда, грузонапряженность участка.

Удельный расход смазки определяли по формуле [2], г/км:

$$N = N_{\text{баз}} \cdot k,$$

где k — поправочный коэффициент, учитывающий индивидуальные особенности кривой,

$$k = k_r \cdot k_{\text{ан}},$$

k_r — коэффициент, учитывающий влияние радиуса кривой на ресурс смазочного материала,

$$k_r = \frac{400}{R};$$

R — радиус кривой, м;

$k_{\text{ан}}$ — коэффициент, учитывающий влияние параметров кривой и скорости движения грузовых поездов по ней на расход смазочного материала; значения $k_{\text{ан}}$ зависят от реализуемого непогашенного ускорения $a_{\text{нп}}$.

Непогашенное ускорение движения грузового поезда по кривой рассчитывали следующим образом:

$$a_{\text{нп}} = \frac{V_{\text{тех}}^2}{3,6 \cdot R} - g \frac{h}{s},$$

где $V_{\text{тех}}$ — установленная техническая скорость движения грузового поезда по кривой, км/ч;

h, s — соответственно возвышение наружного рельса и ширина рельсовой колеи в этой кривой, м;

g — ускорение свободного падения, равно 9,81 м/с².

Среднюю суточную потребность в смазке для работы рельсосмазывателя определяли по формуле, г:

$$M = N[1 - (80 - \Gamma)] \cdot 0,0125 \cdot \frac{19000}{P} \cdot (L_{\text{общ}} - L_{\text{усил}}) \cdot k_{\text{ср}} \cdot k_{\text{рек}} \cdot k_{\text{кл}},$$

где Γ — грузонапряженность участка, млн т брутто;

P — ресурс смазки, осей;

$L_{\text{общ}}$ — общая протяженность участка обращения рельсосмазывателя, км;

$L_{\text{усил}}$ — протяженность элементов пути, которые грузовые поезда проходят в режиме усиления тяги подачей песка, км;

$k_{\text{ср}}$ — средний поправочный коэффициент, учитывающий индивидуальные особенности пути;

$k_{\text{рек}}$ — коэффициент, учитывающий прохождение грузовыми поездами части участка обращения рельсосмазывателя в режиме рекуперации;

$k_{\text{кл}}$ — коэффициент, учитывающий внутригодовое изменение климатических условий.

Для исследования была взята круговая кривая радиусом 570 м, длиной 290 м, с возвышением наружного рельса 64 мм, скорость движения грузовых поездов — 40 км/ч, грузонапряженность участка — 96,66 млн т брутто, режим движения поездов — без тяги. По формулам, приведенным выше, расчетный расход смазочного материала N для данной кривой составил 0,109 г/км, расчетное количество поездок на участке в месяц — 61, что соответствует 2 поездкам рельсосмазывателя в сутки.

В качестве инструмента для измерения коэффициента трения использовали портативный рельсовый трибометр, разработанный ВНИКИ, с модулем МИС-212 НПП «Мера». В соответствии с методикой ВНИИЖТ выполнялась следующая последовательность исследований:

снятие показаний трибометра на боковой грани рельса до нанесения смазки (2–3 раза для точности исследования);

проход рельсосмазывателя;

снятие показаний трибометра после прохода рельсосмазывателя (2–3 раза);

снятие показаний трибометра на боковой грани рельса после прохода железнодорожного состава (2–3 раза), подсчет количества колесных пар в каждом железнодорожном составе;

измерение коэффициента трения до прохождения следующего рельсосмазывателя;

обработка и анализ полученных данных.

Эксперименты проводили в августе и сентябре 2013 г. при различных условиях. Первое измерение коэффициента трения боковой поверхности рельса делали до прохода передвигного рельсосмазывателя на базе локомотива ВЛ 11К-101. В результате двух измерений получен коэффициент трения, равный 0,345 (рис. 1 и 2).

После прохода рельсосмазывателя коэффициент трения составил 0,095 (рис. 3 и 4).

На Свердловской железной дороге, согласно ТУ 0254-001-29269674-2012 [3], используется графитная смазка КР-400. Она применяется при температурах окружающей среды от –45 до +50 °С, в том числе в условиях 100 %-й влажности, изготавливается на основе минерального масла, загущенного литиевыми

мылом жирной кислоты, и содержит антифрикционную, адгезионную и антикоррозионную добавки. В условиях эксплуатации смазка должна легко наноситься, не разбрызгиваться и удерживаться на боковой грани головки рельса при скоростях движения передвижного рельсосмазывателя от 5 до 140 км/ч, рабочем давлении в системе до 15 МПа, нормированном расходе смазочного материала передвижным рельсосмазывателем до 350 г/км. Коэффициент трения на боковой грани головки рельса в зоне наибольшего контактного давления непосредственно после нанесения смазочного материала не должен превышать 0,15, а после пропуска 15 000 осей — 0,25.

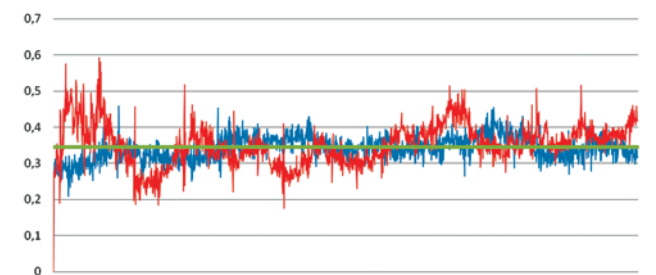


Рис. 1. Коэффициент трения до прохода рельсосмазывателя:
— 1-е измерение; — 2-е измерение; — среднее значение 0,345



Рис. 2. Рельс до прохода рельсосмазывателя

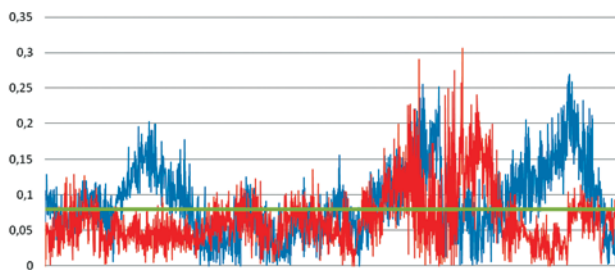


Рис. 3. Коэффициент трения после прохода рельсосмазывателя:
— 1-й проезд; — 2-й проезд; — среднее значение 0,095



Рис. 4. Рельс после прохода рельсосмазывателя

Следующие измерения проводили после прохода 248 осей — грузового состава массой 4125 т (рис. 5 и 6).

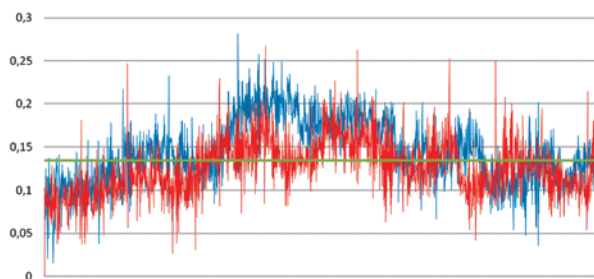


Рис. 5. Коэффициент трения после прохода 248 осей:
— 1-е измерение; — 2-е измерение; — среднее значение 0,135



Рис. 6. Лубрикант на рельсе после прохода грузового состава массой 4125 т

Полученный коэффициент трения соответствовал техническим условиям для смазки КР-400.

Дальнейшие измерения проводили после прохождения различного количества осей (табл. 1, рис. 7 и 8).

Таблица 1

Контрольные точки измерения коэффициента трения

| Время | Оси | Вес, т | Количество прошедших осей на момент измерения | Масса составов, прошедших на момент измерения, т |
|-------------|------|--------|---|--|
| 08:30–09:00 | 248 | 4125 | 248 | 4125 |
| 09:01–10:00 | 112 | 1493 | | |
| 10:01–11:00 | 316 | 5943 | | |
| 11:01–11:30 | 292 | 6303 | 968 | 17864 |
| 11:30–12:00 | 324 | 4292 | 1292 | 22156 |
| 12:01–13:00 | 696 | 13163 | 1988 | 35319 |
| 13:01–14:00 | 872 | 15168 | 2860 | 50487 |
| 14:01–15:00 | 596 | 13401 | 3456 | 63888 |
| 15:01–16:00 | 116 | 1366 | | |
| 16:01–17:00 | 572 | 12791 | | |
| 17:01–18:00 | 344 | 6960 | | |
| 18:01–19:00 | 312 | 6637 | 4800 | 91642 |
| 19:01–20:00 | 846 | 17178 | | |
| 20:01–21:00 | 616 | 13626 | | |
| 21:01–22:00 | 620 | 13251 | | |
| 22:01–23:00 | 1192 | 24563 | | |
| 23:01–24:00 | 608 | 14008 | | |
| 00:01–01:00 | 564 | 12367 | | |
| 01:01–02:00 | 596 | 12658 | | |
| 02:01–03:00 | 852 | 16655 | | |
| 03:01–04:00 | 580 | 12533 | | |
| 04:01–05:00 | 24 | 360 | | |
| 05:01–06:00 | 40 | 600 | | |
| 06:01–07:00 | 88 | 1149 | | |

Окончание табл. 1

| Время | Оси | Вес, т | Количество прошедших осей на момент измерения | Масса составов, прошедших на момент измерения, т |
|-------------|------|--------|---|--|
| 07:01–08:00 | 264 | 4241 | 11690 | 234831 |
| 08:01–09:00 | 540 | 7634 | | |
| 09:01–10:00 | 332 | 7304 | | |
| 10:01–11:00 | 864 | 14228 | | |
| 11:01–12:00 | 578 | 9447 | | |
| 12:01–13:00 | 1096 | 23737 | 15100 | 297181 |

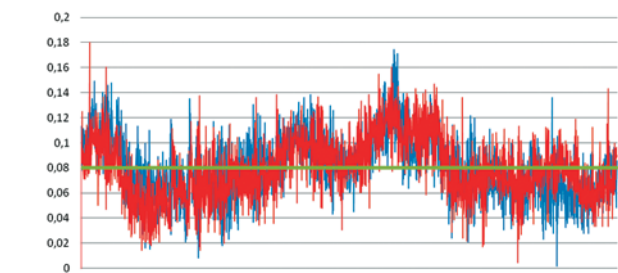


Рис. 7. Коэффициент трения после прохода 1292 осей:

— 1-е измерение; — 2-е измерение; — среднее значение 0,08



Рис. 8. Рельс после прохода грузового состава массой 22 000 т

Рост коэффициента трения начался после прохода 4000 осей, после 11 000 осей был достигнут рекомендуемый в [3] коэффициент трения 0,25, а после прохода 15 000 осей коэффициент имел значение 0,4, что соответствует трению сухого металла о металл (рис. 9).

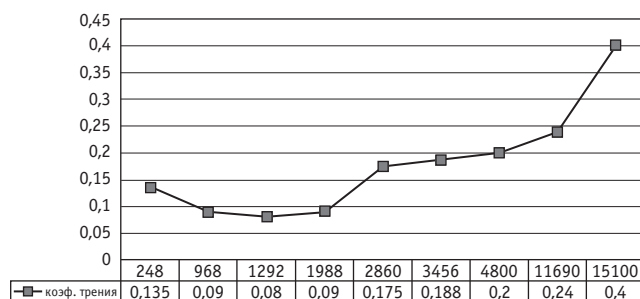


Рис. 9. Изменение коэффициента трения в зависимости от количества пропущенных осей

Таким образом, из проведенного исследования можно сделать вывод, что рекомендуемый ресурс смазки не менее 19 000 осей [2] и не менее 15 000 осей с коэффициентом трения 0,25 [3] не выдерживается. Согласно методике [2], расчетное количество рельсосмазывающих поездов на данном участке должно быть не менее 2 в сутки, что не соответствует реальному положению. Поэтому решением проблемы интенсивного износа рельсов и бандажей колес могло бы стать использование расчетного количества рельсосмазывателей либо внедрение нового вида лубриканта — с большим ресурсом смазки. Кроме того, работа рельсосмазывателя должна сопровождаться мониторингом коэффициента трения с помощью портативного трибометра.

Литература

1. Черный В. С., Богданов В. М., Шаповалов В. В. Комплексная технология рельсосмазывания // Железнодорожный транспорт. 1999. № 5. С. 27–28. ISSN 0044-4448.
2. Об утверждении Методики планирования и нормирования расхода смазочных материалов для лубрикации зоны контакта «колесо — рельс»: распоряжение ОАО «РЖД» от 20.01.2012 № 81р [Электронный ресурс]. URL: <http://epicethics.ru/index.php?ds=262998> (дата обращения: 20.10.2013).
3. ТУ 0254-001-29269674-2012. Смазка для передвижных рельсосмазывателей КР-400 / утв. 05.03.2012; ИТФ Технопром. М., 2012.

References

1. Chernyy V. S., Bogdanov V. M., Shapovalov V. V. Kompleksnaya tekhnologiya relsoszmyvaniya [Complex rail lubrication technology] // Zheleznodorozhnyy transport. 1999. № 5. P. 27–28. ISSN 0044-4448.
2. Ob utverzhdenii Metodiki planirovaniya i normirovaniya raskhoda smazochnykh materialov dlya lubrikatsii zony kontakta «koleso — rels»: rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 20.01.2012 № 81r [On approval of lubricants consumption planning and regulation techniques for lubrication of the contact zone «wheel — rail»: order of JSC Russian Railways of 20.01.2012 № 81r]. [Electronic resource]. URL: <http://epicethics.ru/index.php?ds=262998> (date accessed: 20.10.2013).
3. TU 0254-001-29269674-2012. Smazka dlya peredvizhnykh relsoszmyvateley KR-400 / utv. 05.03.2012 [Grease for mobile rail lubricators KR-400 / ratified on 05.03.2012]; ITF Tekhnoprom. M., 2012.

УДК 624.012.45 (0.75.8)

Семен Макеевич Скоробогатов, доктор технических наук, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры «Строительные конструкции и строительное производство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИЕРАРХИЯ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ БЕТОНА В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Semen Makeyevich Skorobogatov, DSc in Engineering, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASC), Professor, Department of Building Structure and Construction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Hierarchy of concrete cracking in curving concrete elements

Аннотация

Показано, что в области макроразрушения вероятностная природа твердых пористых неоднородных тел приводит к особой иерархической картине трещинообразования и вложенной блочной структуре. Схожий механизм разрушения бетона и горных пород позволяет для описания многоступенчатого процесса трещинообразования использовать геометрическую прогрессию академика М. А. Садовского с множителем 3,5. Иерархическая последовательность расстояний между трещинами 8 см, 30 см, 1 м, 3,5 м и т.д. в целом соблюдается в бетоне и должна служить основой для определения не только предельной ширины раскрытия трещин в крупноразмерных конструкциях, но и живучести конструкций.

Ключевые слова: макроразрушение, иерархия в трещинообразовании, расстояние между трещинами, ширина раскрытия трещин, геометрическая прогрессия, иерархическая последовательность в трещинообразовании бетона, вероятностная природа бетона.

Summary

It is shown that in the field of macro-destruction the probabilistic nature of heterogeneous porous solid bodies leads to a particular hierarchical pattern of cracking and integrated block structure. A similar mechanism of concrete and rocks destruction allows to use geometric progression of Academician M. A. Sadovsky with a factor 3.5 to describe the multi-stage cracking process. A hierarchical sequence of distances between the cracks 8 cm, 30 cm, 1 m, 3.5 m and so on has been generally observed in the concrete and should serve as a basis to identify not only the limit width of cracks in large-size structures, but also durability of the structures.

Keywords: macro-destruction, cracking hierarchy, distance between the cracks, crack opening width, geometric progression, hierarchical sequence of cracking in concrete, concrete probabilistic nature.

С повышением абсолютного размера конструкции увеличивается вероятность возникновения объемов бетона с пониженной прочностью на растяжение, т.е. получается масштабный эффект. Вероятностная природа твердых пористых тел приводит к особому иерархическому механизму трещинообразования и вложенной блочной структуре. Это общее свойство твердых пористых неоднородных тел — бетона, гранита, известняка, песчаника и т.д. В описании схожести блочного механизма разрушения несплошных материалов в российской литературе особое место занимают труды М. М. Холмянского [1] и М. Г. Зерцалова [2]. Приоритет во всестороннем изучении трещинообразования в неоднородных пористых телах исторически, по-видимому, принадлежит структурной геофизике. Классификация трещин в горных породах приведена в монографии [3, с. 22].

Так же, как и для бетона, для гранита экспериментально получаемые величины прочности на сжатие в сотни и тысячи раз меньше теоретических. Причина расхождений кроется в несовершенстве связей между кристаллами и в различных дефектах на границах между зернами. Согласно теории хрупкого разрушения считается, что соотношение между прочностью на сжатие и растяжение составляет $R_b/R_{bt} = 8-17$.

В связи с этим следует упомянуть о соотношении между бетоном и горными породами в исследовательской технике по прочности. Несмотря на большую неоднородность, бетонный куб (или образец с размерами $2,0 \times 1,0 \times 0,5$ м) может служить объектом «чистого эксперимента» как модель горной породы [4].

Близость прочностных свойств и механизмов разрушения породила в последние десятилетия целый поток исследований, посвященных совместному изучению проблем прочности генетически разных материалов — бетона, гранита и керамики. Эта тема обсуждалась, в частности, на международных конференциях в Хьюстоне (США, 1987 г.) и Нордвике (Нидерланды, 1991 г.), а также рассматривалась в солидных сборниках научных трудов.

Условно эти исследования можно разделить на два направления — микроразрушение и макроразрушение. Наибольшей новизной отличается второе. Чем крупнее изучаемое тело, тем больше предпосылок к признанию единства механизма разрушения. В данной работе изложение концепции иерархии в трещинообразовании касается только области макроразрушения.

Для больших массивов свойственна вложенность, т.е. более мелкие блоки, очерченные трещинами, вложены в более крупные. В малых объемах до 8 см (обоснование см. ниже) с квазиоднородной смесью и квазиупругой работой целесообразно рассматривать технологическую структуру цементного камня и бетона с соответствующими трещинами и пустотами. Для больших объемов, где действуют большая неоднородность и законы вероятности, целесообразно рассматривать прочностную структуру системы вложенных блоков, соответствующую единому механизму повреждения.

Несмотря на различие подходов в описании технологической структуры бетона в связи с микротрещинообразованием по О. Я. Бергу (1971), М. М. Холмянскому (1998), Ю. В. Зайцеву (1991), можно принять следующие уровни цементного камня и бетона. Первый уровень технологической структуры бетона — это микроструктура цементного камня, находящегося между зернами мелкого заполнителя и включающего в себя поры цементного камня с размером 0,1 мм как зародыши будущих трещин. Характерный размер элемента структуры примерно 0,5 мм. Второй уровень — структура объемов цементного камня или цементно-песчаного раствора, находящегося между зернами крупного заполнителя и включающего в себя мелкий заполнитель. Размер элемента этой структуры около 10 мм. Третий уровень — структура бетона, включающего в себя в качестве основного элемента зерна крупного заполнителя (щебня, гравия) с размером 10^2 мм и более.

Эта структура и соответствующие ей трещины, которые развиваются под нагрузкой, готовят другую прочностную структуру — она по размерам сдвинута в сторону увеличения. При переходе к прочностной структуре необходимо учитывать границу между квазиупругой работой малого объема, когда действует теория подобия, и явлением, когда массив бетона превращается в систему вложенных блоков и где действует масштабность, но не действует теория подобия (М. М. Холмянский, 1998). Действие масштабности заставляет рассматривать иерархическую картину трещинообразования в реальных конструкциях.

На основе анализа картин трещин, представленных в работах И. И. Иосилевского, Л. Б. Мойжеса, Н. Г. Стулий, Л. П. Трапезникова, О. Я. Берга, А. И. Матарева, Ю. В. Дмитриева, L. C. Snowdon, Y. Goto [5], можно предложить условно нормализованную схему иерархии в трещинообразовании (рис. 1). На рис. 1 показаны три уровня прочностной структуры и соответственно им микротрещины порядка 50 мкм, мезотрещины порядка 0,1 мм и макротрещины порядка 0,2–0,4 мм. Видно, что растянутая зона разделена на блоки первого уровня, которые объединяются блоками более высокого уровня.

Трехступенчатая система постепенного повреждения растянутой зоны бетона характерна для широко распространенных конструкций. Трещины более высокого уровня, естественно, можно наблюдать в крупноразмерных конструкциях. Так, на рис. 2,

заимствованном из работы Ю. В. Дмитриева и Н. Н. Коробейникова [6], представлена редкая картина равномерного сочетания трещин 4-го (мегатрещины) и 3-го (макротрещины) уровня.

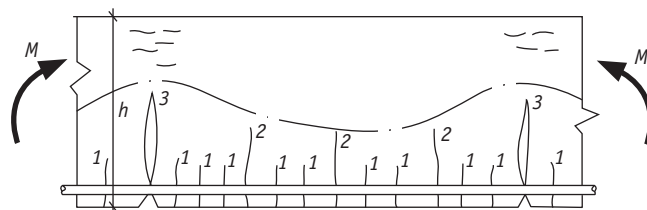


Рис. 1. Схема трещин при условно нормализованной иерархии для прочностной структуры бетона:
1 — микротрещины; 2 — мезотрещины; 3 — макротрещины

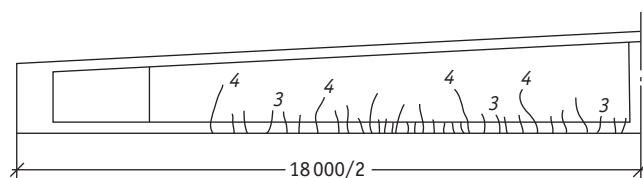


Рис. 2. Схема расположения трещин 3-го и 4-го уровня в предварительно напряженной балке БНАС-18-А (опыты Ю. В. Дмитриева и Н. Н. Коробейникова [6])

Чтобы дальше продолжать иерархию в размерах трещин и соответственно в блоках, разделенных этими трещинами над железобетоном и в структурной геофизике, необходимо (с учетом опыта исследований) установить наиболее вероятные границы для этих структурных образований.

Для назначения уровней в абсолютных размерах бетонных блоков очень важно обосновать стартовую величину (см), с превышением которой бетон не подчиняется теории подобия, а превращается в систему с периодически меняющимся псевдопластическим состоянием и хрупким разрушением. Обращает на себя внимание размер блока 8 см, соответствующий мезотрещинам (второй уровень), при превышении которого, по данным Е. Н. Пересыпкина [7], сохраняется постоянное значение коэффициента интенсивности K_{Ic} , что, по нашему мнению, является критерием материала для объема со стороной 8 (7,9) см. При превышении 8 см твердое тело или бетон должны рассматриваться как система из иерархически вложенных друг в друга блоков. Следовательно, критический размер $h_{cr} = 8$ см может быть принят как стартовый для бетона искусственных сооружений.

Для описания иерархии в размерах тела предлагается следующая геометрическая прогрессия: 8 см; $8 \times 3,5$; $8 \times 3,5^2$; $8 \times 3,5^n$. Множитель 3,5 в геометрической прогрессии предложен академиком М. А. Садовским и упомянут, в частности, в монографии [8, с. 28]. Из исследований в структурной геофизике [8–10] известно, что размеры блоков различаются (с достаточно большим разбросом, иногда до 40%). Однако средняя величина шага перехода между уровнями соответствует множителю 3,5.

В абсолютных размерах для искусственных сооружений иерархическую последовательность можно принять (округленно) следующей: 8 см, 30 см, 1 м, 3,5 м, 12,2 м, 42 м, 147 м. Последний

более точный размер — 145,3 м — удивительно соответствует высоте пирамиды Хеопса — 146,6 м. Это совпадение вряд ли случайно, так как возможно, что древние египтяне связывали строительные высоты с размерами блоков в горных пластах. Однако если исходить из размеров блоков в горных пластах и экваториальной окружности земного шара 40075,696 км (18-й уровень), то основание геометрической прогрессии следует уменьшить всего на 1,25 % и назначить его не 8 см, а 7,9 см. Тогда будем иметь подправленную геометрическую прогрессию для железобетонных и бетонных сооружений (табл. 1).

Таблица 1

Условно нормализованная иерархия
в трещинообразовании искусственных сооружений

| | | | | | | | |
|--|------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Уровень блочности | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Размер блока (l_{crc} , h_{crc}) | 8 см | 28 см | 98 см | 3,43 м | 12,0 м | 42,0 м | 147 м |

В табл. 1 уровень трещин 2 с глубиной $h_{crc} = 8$ см является базовым, он соответствует технологическому уровню мезоструктуры. Уровень трещин 3 с глубиной $h_{crc} = 28$ см характерен для наиболее распространенных железобетонных изгибаемых элементов с высотой сечения $h = 0,6–0,8$ м. Отметим, что физико-механические свойства бетонных образцов с размерами 10–30 см особенно хорошо изучены. Если вернуться к рис. 1, характеризующему иерархию, следует отметить свойство вложенности блоков. Количество трещин и их уровень зависят от неоднородности бетона, т.е. от возможного колебания его прочности. Важно отметить, что количество трещин менее высокого второго уровня, расположенных в диапазоне трещин более высокого третьего уровня, колеблется от 2 до 3, а количество блоков — от 3 до 4, т.е. в среднем 3,5.

Иерархия уровня с четвертого по шестой наблюдается в более массивных железобетонных элементах, например в гидротехнических сооружениях.

Многолетний опыт наблюдения за трещинообразованием в бетонных и железобетонных конструкциях отражен в современных руководствах и пособиях по проектированию взлетно-посадочных полос, гидротехнических сооружений и объектов общего строительного назначения.

Наиболее четко предложенная схема иерархии подтвердилась в картинах трещин, возникших от равномерного ударно-волнового воздействия в 8 высоких монолитных балках в покрытии здания Екатеринбургского цирка [5].

На рис. 3 показана в плане одна из угловых систем перекрестных балок, несущих тяжелую нагрузку от подвесного зала — фойе цирка. Каждая система состоит из двух консольно-перекрестных монолитных балок (Б-2 и Б-4) двутаврового сечения, длиной 19 и 15 м, которые в месте пересечения опираются на одну колонну круглого сечения $D = 1200$ мм. Перекрестная балка Б-4 поддерживает по своим концам более низкие в поперечном сечении несущие балки Б-1. Высота балок Б-2 и Б-4 составляет 3360 мм, толщина стенок 200 мм. Проектная марка бетона — М300, что подтвердилось механическими

испытаниями. Стенки балок армированы хомутами из стержневой арматуры $2\varnothing 14$ А400 с шагом 200 мм. По соотношению сторон обследуемые балки относятся к балкам-стенкам с соответствующим видом напряженного состояния.

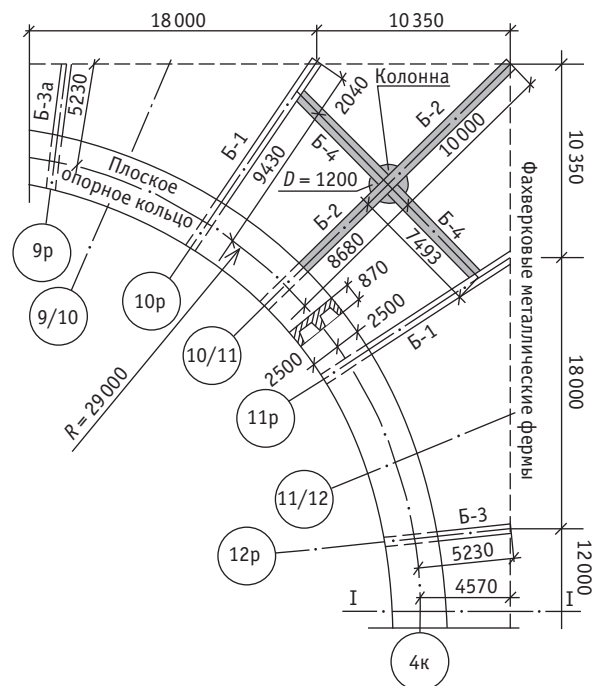


Рис. 3. Схема расположения монолитных балок в чердачном помещении (уровень низа балок +9,25 м)

Крупноразмерные стенки-балки получили от близко расположенного (около 100 м) источника взрыва (при строительстве метро) равномерное дробящее воздействие на все части стенки независимо от расположения растянутой и сжатой зон. При этом балки не успели воспринять из широкого спектра колебаний собственные частоты и были лишены традиционного резонансно-колебательного сопротивления.

Было обследовано 15 поверхностей на восьми высоких балках [5]. Общее количество осмотренных и измеренных трещин с шириной раскрытия от 0,05 до 1,15 мм превышало 850 (рис. 4).

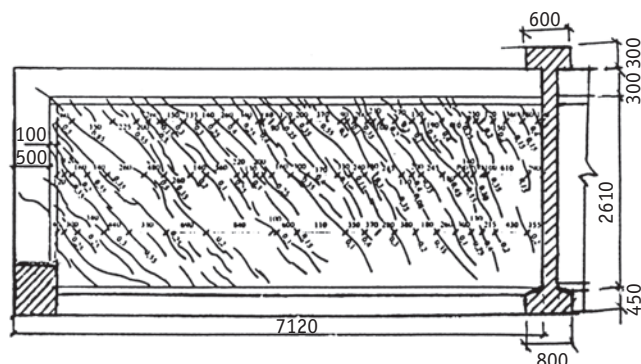


Рис. 4. Картина трещин от равномерного дробящего воздействия близко расположенного источника взрыва

Наличие хомутов в стенках балок, по-видимому, мало сказалось на расстоянии между трещинами и на их расположении. Особенность ударно-волнового воздействия заключается в том, что оно равномерно раздробило более тонкий элемент — стенку — и совершенно не затронуло более толстые элементы — верхний и нижние пояса (см. рис. 4). По высоте в балках были условно выделены три напряженные зоны — растянутая, нейтральная и сжатая (рис. 5). Расположение этих зон не повлияло на характер трещин. Вероятно, равномерное ударно-волновое воздействие представило «чистый эксперимент» для изучения проблемы иерархии в трещинообразовании твердых тел, что позволило еще раз подтвердить возможность существования предложенной условно нормализованной схемы в трещинообразовании [5].

Угол наклона трещин несколько отличался от ожидаемого $\alpha = 45^\circ$ — изменялся в пределах $50-52^\circ$, что не сказалось на равномерности расположения трещин.

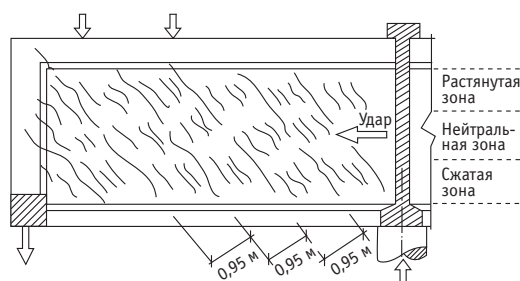


Рис. 5. Условно нормализованная схема появления трещин при равномерном ударно-волновом воздействии

В результате статистической обработки по всем зонам были построены гистограммы распределения (рис. 6). Как видно из рис. 6, гистограммы имеют несколько мод, что говорит о полимодальном характере распределения трещин. Основные моды соответствовали трещинам с раскрытием $0,2-0,4$ мм. Отдельно образовались моды для более широко раскрытых трещин ($0,9$ мм и более). На всех гистограммах выделяется вершина (или моды) при раскрытии трещин с шириной около $0,35$ мм. Эта устойчивая вершина, таким образом, не зависела от вида зоны напряжений.

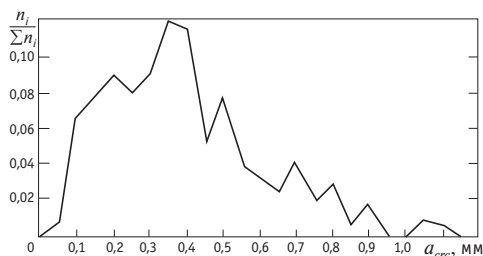


Рис. 6. Распределение величин ширины раскрытия трещин по 15 поверхностям 8 балок типа Б-2 и Б-4

В полимодальном распределении необходимо выделить медианы или моды, характеризующие трещины разного уровня, для подтверждения их иерархии. С этой целью вдоль всех зон напряжений условно выполнены продольные сечения и построены специальные графики, демонстрирующие величины раскрытия трещин и расстояния между ними (рис. 7).

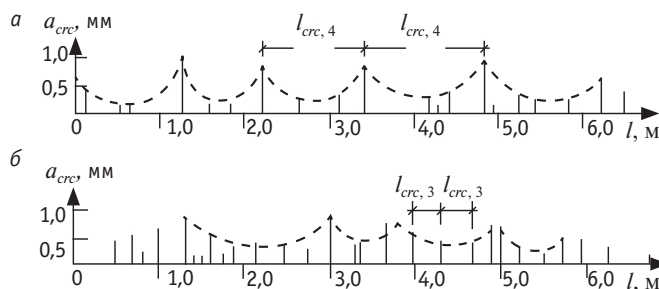


Рис. 7. Иерархия в ширине раскрытия трещин $\alpha_{crc,3}$ и $\alpha_{crc,4}$ и в расстояниях между трещинами $l_{crc,3}$ и $l_{crc,4}$ на левой (а) и внутренней (б) поверхности балки-стенки Б-2, ось бр/7р

На графиках (см. рис. 7) трещины как бы разделились на два уровня: третий уровень с шириной раскрытия $\alpha_{crc,3} = 0,1-0,4$ мм, что соответствует величинам, упомянутым в СНиП 52-01-2003, для наиболее распространенных конструкций при их нормальной эксплуатации, и четвертый уровень, включающий трещины с шириной раскрытия $\alpha_{crc,4} = 0,45$ мм и более. Между трещинами типа $\alpha_{crc,3}$ и $\alpha_{crc,4}$ замерялись расстояния $l_{crc,3}$ и $l_{crc,4}$.

Установлено, что для всех расстояний характерен большой разброс относительно средних величин: средняя квадратическая ошибка иногда достигала 40%. Видимо, поэтому исследователи железобетона так редко обращаются к этой проблеме. Вероятное отклонение

$$\left(\frac{t\sigma}{\sqrt{n-1}} \right)$$

от среднего значения $l_{crc,3}$ при обеспеченности $P = 0,95$ составило от 14,6 до 3,7%. Для величины $l_{crc,4}$ оно немного больше — в пределах 17,1–19,8. Средние математические ожидания для $l_{crc,3}$ и $l_{crc,4}$ соответственно равны 256,9 и 949 мм. Такие ожидания отличаются от нормализованных величин $l_3 = 276,6$ мм и $l_4 = 968,1$ мм на 6,2 и 1,9% соответственно. Поскольку распределение величин l_{crc} несимметрично, то трудно предполагать, что математическое ожидание для l_{crc} совпадает с соответствующей медианой.

Для подтверждения предложенной условно нормализованной иерархии в трещинообразовании важно установить коэффициент перехода с четвертого на третий уровень.

Расчеты показали, что этот коэффициент

$$\left(m_{3,4} = \frac{l_{crc,4}}{l_{crc,3}} \right)$$

оказался равным 3,68, т.е. отличается от коэффициента геометрической прогрессии 3,5 на 5,1%.

Таким образом, можно сказать, что условно нормализованная иерархия в трещинообразовании не противоречит опытным данным и в пределах вероятных статистических ошибок является значимой и приемлемой для искусственных сооружений.

Результаты анализа условно нормализованной иерархии в трещинообразовании показали, что в крупноразмерных конструкциях возможно появление недопустимо раскрытых трещин, что понизит их живучесть и долговечность. Поэтому материалы

по изучению иерархии должны служить базой для решения следующих конструктивных и эксплуатационных проблем.

1. Разработка энтропийной методики расчета накопления повреждений и определения живучести железобетонных конструкций.

2. Определение ширины раскрытия трещины и назначение ее предельной ширины, особенно для крупноразмерных конструкций. В соответствии со СНиП 52-01-2003 и СП 52-101-2003 базовое расстояние между трещинами l_s , влияющее на ширину раскрытия трещины, ограничивается 40 см для элементов с рабочей высотой поперечного сечения не более 1 м. Крупноразмерные конструкции, согласно иерархии трещинообразования, способны значительно превышать рекомендованное расстояние $l_s = 40$ см, что может вызвать трещину опасной величины и, как следствие, коррозию арматуры и снижение долговечности конструкции.

3. Введение специально инициируемых трещин. Мгновенное появление сквозной трещины порождает динамический удар, особенно в крупноразмерном изгибаемом элементе, приводит к нежелательному изменению его напряженного состояния и уменьшению величины его жесткости. По данным [11], ис-

кусственное создание специально инициируемых трещин снижает негативное динамическое воздействие и даже повышает величину жесткости изгибаемых конструкций.

ВЫВОДЫ

1. На основе единого механизма повреждения бетона и горных пород в области макроразрушения предложена условно нормализованная иерархическая схема в трещинообразовании бетона. Она включает многоступенчатое появление трещин разного уровня, которые очерчивают соответственно вложенную блочную систему, состоящую из микро-, мезо- и макроструктуры.

2. Предложенная схема иерархии в трещинообразовании, несмотря на большой разброс, не противоречит многим картинам трещин из экспериментальных исследований. Наибольшее подтверждение она получила в результате раздробления высоких балок под равномерным ударно-волновым воздействием.

3. Условно нормализованная схема иерархии в трещинообразовании представляет собой базу для создания методики живучести при предотвращении катастроф, уточнения предельных величин раскрытия трещин и прогибов в больших конструкциях.

Литература

1. Холмянский М. М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. М. : Стройиздат, 1997. 559 с.
2. Орехов В. Г., Зерцалов М. Г. Механика разрушения инженерных сооружений и горных пород. М. : АСВ, 1999. 327 с.
3. Ржевский В. В., Носик Г. Я. Основы физики горных пород. М. : Недра, 1978. 390 с.
4. Соболев Г. Ф. Исследование разрушения барьеров применительно к проблеме прогноза землетрясений // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях : сборник трудов / Под ред. М. М. Садовского и Г. А. Соболева. М. : Наука, 1987. С. 12–26.
5. Скоробогатов С. М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории). Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 511 с.
6. Дмитриев Ю. В., Коробейников Н. Н. Исследование непрерывно армированных предварительно напряженных строительных балок // Предварительно напряженные железобетонные конструкции производственных зданий / Под ред. Г. И. Бердичевского. М. : Стройиздат, 1963. С. 98–131.
7. Пересыпкин Е. Н. Расчет стержневых железобетонных элементов. М. : Стройиздат, 1988. 169 с.
8. Друма А. В., Шебалин Н. В. Землетрясение: где, когда и почему? / Отв. ред. М. А. Садовский; АН Молдавской ССР. Кишинев : Штиинца, 1985. 196 с.
9. Садовский М. А., Балховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М. : Наука, 1987. 100 с.
10. Петров В. А. Статистическая кинетика энерговыделения в разрушаемой неоднородной иерархической системе // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясении. М. : Наука, 1987. С. 27–35.
11. Митасов В. М., Себешев В. Г., Логунова М. А. Конструктивные особенности и расчет железобетонных плит с заранее организованными трещинами // Известия вузов. Строительство. 2012. № 6. С. 119–123.

References

1. Kholmyanskiy M. M. Beton i zhelezobeton. Deformativnost i prochnost [Concrete and reinforced concrete. Deformability and strength]. M. : Stroyizdat, 1997. 559 p.
2. Orekhov V. G., Zertsalov M. G. Mekhanika razrusheniya inzhenernykh sooruzheniy i gornykh porod [Fracture mechanics of engineering structures and rocks]. M. : ASV, 1999. 327 p.
3. Rzhnevskiy V. V., Nosik G. Ya. Osnovy fiziki gornykh porod [Fundamentals of rock physics]. M. : Nedra, 1978. 390 p.
4. Sobolev G. F. Issledovanie razrusheniya barerov primenitelno k probleme prognoza zemletryaseniya [Study of destruction of barriers with respect regarding the issue of earthquake prediction] // Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornykh porod pri zemletryaseniya: sbornik trudov / Pod red. M. M. Sadovskogo i G. A. Soboleva. M. : Nauka, 1987. P. 12–26.
5. Skorobogatov S. M. Katastrofy i zhivuchest zhelezobetonnykh sooruzheniy (klassifikatsiya i elementy teorii) [Disasters and vitality of reinforced concrete structures (classification and elements of theory)]. Ekaterinburg : USURT, 2009. 511 p.
6. Dmitriev Yu. V., Korobeynikov N. N. Issledovanie nepreryvno armirovannykh predvaritelno napryazhennykh stroitelnykh balok [The study of continuously reinforced prestressed construction beams] // Predvaritelno napryazhennyye zhelezobetonnyye konstruktii proizvodstvennykh zdaniy / Pod red. G. I. Berdichevskogo. M. : Stroyizdat, 1963. P. 98–131.
7. Peresypkin E. N. Raschet stержnevyykh zhelezobetonnykh elementov [Design of core concrete elements]. M. : Stroyizdat, 1988. 169 p.
8. Drumya A. V., Shebalin N. V. Zemletryasenie: gde, kogda i pochemu? [Earthquake: where, when and why?] / Otv. red. M. A. Sadovskiy ; AN Moldavskoy SSR. Kishinev : Shtiintsa, 1985. 196 p.
9. Sadovskiy M. A., Balkhovitinov L. G., Pisarenko V. F. Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seysmicheskoy protsess [Deformation of geophysical environment and seismic process]. M. : Nauka, 1987. 100 p.
10. Petrov V. A. Statisticheskaya kinetika energovydeleniya v razrushayemy neodnorodnoy ierarkhicheskoy sisteme [Statistical kinetics of energy release in a degradable heterogeneous hierarchical system] // Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornykh porod pri zemletryaseni. M. : Nauka, 1987. P. 27–35.
11. Mitasov V. M., Sebeshev V. G., Logunova M. A. Konstruktivnye osobennosti i raschet zhelezobetonnykh plit s zaranee organizovannymi treschinami [Structural features and design of reinforced concrete slabs with a pre-organized cracks] // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2012. № 6. P. 119–123.

УДК 692.522.2:624.073.136

Антон Витальевич Шипуля, аспирант кафедры «Строительные конструкции и строительное производство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Семен Макеевич Скоробогатов, доктор технических наук, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры «Строительные конструкции и строительное производство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ БОРТОВОЙ БАЛКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ

Anton Vitalyevich Shipulya, graduate student, Department of Building Structure and Construction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Semen Makeyevich Skorobogatov, DSc in Engineering, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASC), Professor, Department of Building Structure and Construction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Basic research methods to study the influence of edge beam on stress-strain state reinforced concrete floor slab

Аннотация

Проанализированы проблемы конструирования безбалочных бескапитальных монолитных железобетонных перекрытий. Сделан акцент на необходимости увеличения жесткости крайних пролетов путем включения в состав перекрытия бортовых (контурных) балок. Предложен вариант методики оценки влияния бортовой балки на плиту перекрытия, учитывающий изменение упругопластических свойств бетона. Даны первичные рекомендации по оптимальным размерам бортовой балки. Обоснованность выводов предлагаемой методики подтверждается совпадением результатов вычислений по двум методам — методу сил и методу перемещений.

Ключевые слова: безбалочное бескапитальное перекрытие, пролетная полоса, бортовая балка, жесткость, метод сил, метод перемещений, крутящий момент.

Summary

The problems of designing beamless monolithic concrete flat floor slabs have been analyzed. The emphasis is put on the need to increase the rigidity of the end spans by including edge (countour) beams in the floor slab. A methodology for assessing the influence of edge beam on the floor slab is proposed, taking into account the change in elastic-plastic properties of the concrete. Initial recommendations on the optimal size of edge beams are given. Validity of the conclusions of the proposed method is confirmed by matching results of analysis by two methods — the force method and displacement method.

Keywords: beamless flat floor slab, span bar, edge beam, stiffness, force method, displacement method, torque.

1. ТРУДНОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ БЕЗБАЛОЧНЫХ БЕСКАПИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

В настоящее время административно-бытовые, а также здания, предназначенные для технической автоматизированной эксплуатации железных дорог и объектов транспортного строительства, все чаще конструируются с применением бескапитальных безбалочных перекрытий. Предпочтение, отдаваемое безбалочным системам, связано с функциональными требованиями к гибкости объемно-планировочных решений зданий инфраструктуры железной дороги и необходимостью их неоднократных перепланировок в процессе эксплуатации. Между тем для бескапитальных конструкций задача ограничения прогибов более сложна, чем для капитальных [1, 2]. Из-за общей незначительной толщины перекрытий и отсутствия капителей прогибы плит перекрытий относительно велики. Увеличение пролетов между колоннами (более 6 м) и неоправданное утолщение плит перекрытий требуют повышения жесткости крайних пролетов. Отличным конструктивным решением по уменьшению прогиба наиболее уязвимых крайних ячеек перекрытия служит включение в состав последнего бортовых (контурных) балок. Тем не менее в отечественной литературе учету бортовых балок в расчетах и исследованию их работы в составе перекрытия практически не уделяется внимания.

Все вышесказанное подтверждает настоятельную необходимость разработать методику оценки влияния бортовой балки на плиту перекрытия, учитывающую изменение упругопластических свойств бетона, трещинообразование и армирование.

Нами для расчетов взят фрагмент плиты бескапитального безбалочного перекрытия с размерами в плане 7,2×7,2 м. Бетон плиты класса В25, ее толщина — 22 см. Вдоль висячего края

расположена бортовая балка сечением 20×60 см ($b \times h$). Длительно действующая нагрузка составляет $0,75$ тс/м². При этом общая нагрузка разделена на две условных: одна — нагрузка на пролетную полосу ($0,5761$ тс/м²), другая — на надколонную ($0,9227$ тс/м²), в нашем случае — на бортовую балку. На основе алгоритма, описанного в [3], определение условной нагрузки $q_{усл}$ для надколонной и пролетной полосы шириной 1 м как замещающей балки позволяет учесть влияние поперечных сил от соседних полос, дополнительно нагружающих и разгружающих эти две полосы. Обоснованность выводов предлагаемой методики подтверждается совпадением результатов расчетов по двум методам — методу сил и методу перемещений. Поскольку вычисление коэффициентов при неизвестных в уравнениях метода сил и метода перемещений связано с определенными трудностями, было решено использовать инженерный способ, основанный на схеме, приведенной на рис. 1 (схема подтверждена исследованиями американских ученых [4, гл. 7]). Кроме того, были выполнены специальные расчеты пластинок в рамках теории упругости методом конечных элементов.

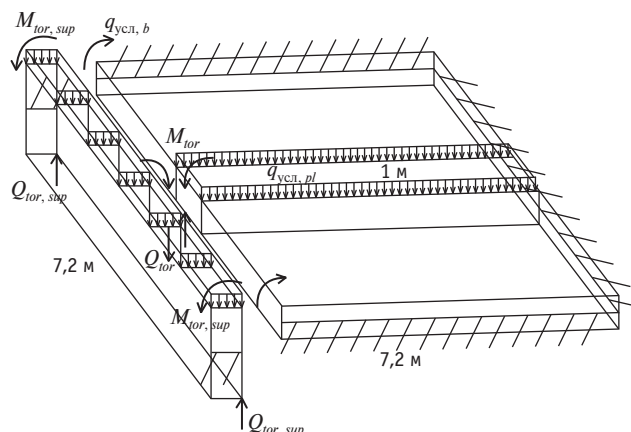


Рис. 1. Пространственная расчетная статическая схема краевого эффекта взаимодействия между пролетной полосой и бортовой балкой

2. РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ СИЛ

Принимаем основную систему в рамках метода сил, для чего разрезаем пролетную полосу в виде балки шириной 1 м и толщиной $\delta = 22$ см от бортовой балки сечением $h \times b = 0,6 \times 0,2$ м и действие отброшенных частей заменяем неизвестными M_{tor} и Q_{tor} (рис. 1–3). Такой подход существенно упрощает расчеты и позволяет рассматривать плиту, защемленную с трех сторон, как замещающую консольную балку.

Для совпадения деформаций плиты и замещающей балки, вычисляя прогибы и коэффициенты при неизвестных в уравнениях метода сил, используем коэффициент перехода от защемленной по трем сторонам плиты к замещающей консольной балке (рис. 4). По справочному пособию А. Б. Голышева [5, с. 360–373], прогиб свободного края плиты

$$f_{y,pl} = 0,00276 \frac{ql^4}{D},$$

для консольной балки прогиб равен

$$f_{y,con} = 0,125 \frac{ql^4}{D}.$$

Коэффициент перехода:

$$k_{pl} = f_{y,pl} / f_{y,con} = 0,00276 / 0,125 = 0,0221.$$

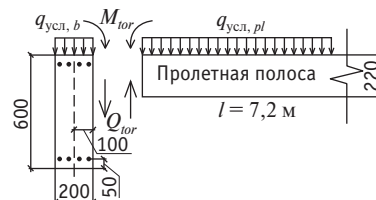


Рис. 2. Плоская расчетная схема краевого эффекта между пролетной полосой и бортовой балкой посередине пролета

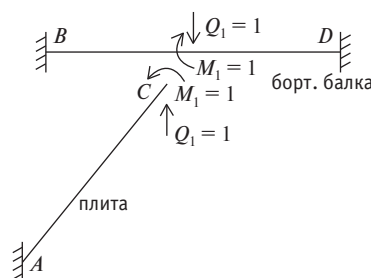


Рис. 3. Предлагаемая система метода сил, эквивалентная пространственной схеме, представленной на рис. 1

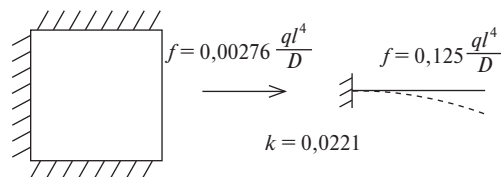


Рис. 4. Схема перехода от плиты к замещающей балке, $k = 0,0221$

В итоге тонкая полоса (балка шириной 1 м) дает прогиб как средняя часть плиты.

В рамках метода сил для решения задачи используем два условия равенства нулю взаимного угла поворота и взаимного перемещения бортовой балки и пролетной полосы:

$$\begin{cases} \varphi_b = \varphi_{pl}; \\ \Delta_b = \Delta_{pl}. \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

Подробнее эти уравнения запишем следующим образом:

$$\begin{cases} M_{tor} \delta_{11b} + Q_{tor} \delta_{12b} + \Delta_{1Pb} = M_{tor} \delta_{11pl} + Q_{tor} \delta_{12pl} + \Delta_{1Ppl}; \\ M_{tor} \delta_{21b} + Q_{tor} \delta_{22b} + \Delta_{2Pb} = M_{tor} \delta_{21pl} + Q_{tor} \delta_{22pl} + \Delta_{2Ppl}. \end{cases} \quad (1') \quad (2')$$

Значения коэффициентов при неизвестных (рис. 5):

- δ_{11b} — угол поворота балки от момента $M_{tor} = 1$;
- δ_{12b} — угол поворота балки от поперечной силы $Q_{tor} = 1$;
- δ_{11pl} — угол поворота плиты от момента $M_{tor} = 1$;
- δ_{12pl} — угол поворота плиты от поперечной силы $Q_{tor} = 1$;
- δ_{21b} — перемещение балки от момента $M_{tor} = 1$;
- δ_{22b} — перемещение балки от поперечной силы $Q_{tor} = 1$;
- δ_{21pl} — перемещение плиты от момента $M_{tor} = 1$;
- δ_{22pl} — перемещение плиты от поперечной силы $Q_{tor} = 1$.

Грузовые члены:

- Δ_{1pb} — угол поворота балки от внешних сил, в данном случае $\Delta_{1pb} = 0$;
- Δ_{1ppl} — угол поворота плиты от внешних сил;
- Δ_{2pb} — перемещение балки от внешних сил;
- Δ_{2ppl} — перемещение края пролетной полосы от внешних сил.

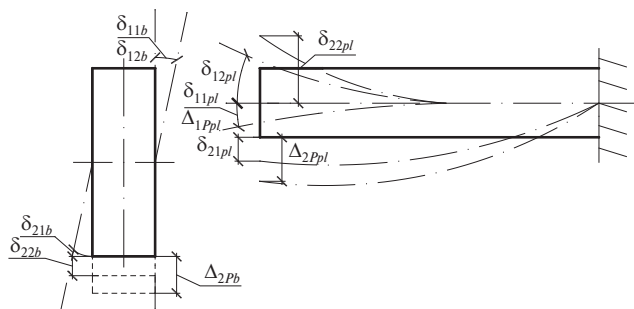


Рис. 5. Схема возможных перемещений для определения коэффициентов при неизвестных и грузовых членов в уравнениях метода сил

Найдем характеристики отдельной бортовой балки и плиты (замещающей балки) для пролетной полосы: момент инерции кручения бортовой балки $I_{tor, b}$, осевой момент инерции бортовой балки $I_{xred, b}$ и плиты $I_{xred, pl}$, изгибную жесткость бортовой балки D_b и плиты D_{pl} без трещин.

Определим коэффициенты при неизвестных в уравнениях метода сил для бортовой балки (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты при неизвестных применительно к методу сил для бортовой балки

| Коэффициенты при неизвестных | Статическая схема |
|--|-------------------|
| $\delta_{11b} = \frac{0,5M_1 \cdot l}{GI_{tor, b}}$ | |
| $\delta_{12b} = \delta_{21b} = 0$ | — |
| $\delta_{22b} = y\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{l^3}{192D_b}$ | |

Окончание табл. 1

| Коэффициенты при неизвестных | Статическая схема |
|--|---|
| $\Delta_{1pb} = 0$ | Результирующая сила от внешней распределенной нагрузки на бортовую балку приложена центрально, поэтому не вызывает ее поворота и соответственно крутящего момента в балке |
| $\Delta_{2pb} = \frac{5q_{усл, b} l^4}{384D_b} - 2 \cdot \frac{M_{sup} l^2}{16D_b} = \frac{5q_{усл, b} l^4}{384D_b} - 2 \cdot \frac{q_{усл, b} l^2}{12} \cdot \frac{l^2}{16D_b} = \frac{q_{усл, b} l^4}{384D_b}$ | |

Найдем коэффициенты при неизвестных в уравнениях метода сил для плиты (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты при неизвестных применительно к методу сил для плиты

| Коэффициенты при неизвестных | Статическая схема |
|--|-------------------|
| $\delta_{11pl} = \theta = \frac{1 \cdot l}{D_{pl}} \cdot k_{pl}$ | |
| $\delta_{12pl} = \theta = -\frac{1 \cdot l^2}{2D_{pl}} \cdot k_{pl}$ | |
| $\delta_{21pl} = f = -\frac{1 \cdot l^2}{2D_{pl}} \cdot k_{pl}$ | |
| $\delta_{22pl} = f = \frac{1 \cdot l^3}{3D_{pl}} \cdot k_{pl}$ | |
| $\Delta_{1ppl} = \frac{q_{усл, pl} l^3}{6D_{pl}} k_{pl}$ | |
| $\Delta_{2ppl} = -\frac{q_{усл, pl} l^4}{8D_{pl}} k_{pl}$ | |

При решении системы уравнений (1) и (2) получаем искоемые величины крутящего момента M_{tor} и поперечной силы Q_{tor} .

3. РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ (ДЕФОРМАЦИЙ)

Принимаем основную систему в рамках метода перемещений, для чего вводим в соединение бортовой балки с плитой необходимые связи: защемление, препятствующее повороту, и линейную связь, препятствующую линейному смещению. Разрезаем пролетную полосу в виде балки шириной 1 м и толщиной $\delta = 22$ см от бортовой балки сечением $h \times b = 0,6 \times 0,2$ м (рис. 6).

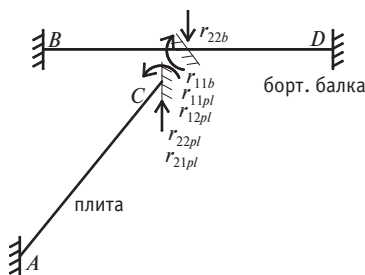


Рис. 6. Основная система метода перемещений

Чтобы обратно перейти к заданной системе, необходимо отрицать усилия во введенных связях. Для решения задачи используем два условия равенства нулю взаимных моментов и взаимных усилий бортовой балки и пролетной полосы:

$$\begin{cases} R_i = \sum M = R_{ib} - R_{ipl} = 0 \\ R_{2i} = \sum Q = R_{2ib} - R_{2ipl} = 0 \\ \begin{cases} R_{ib} = R_{ipl} \\ R_{2ib} = R_{2ipl} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Подробнее эти уравнения запишем следующим образом (согласно рис. 6):

$$\begin{cases} r_{11b}z_1 + r_{12b}z_2 + R_{1pb} = -(r_{11pl}z_1 + r_{12pl}z_2 + R_{1ppl}); \\ r_{21b}z_1 + r_{22b}z_2 + R_{2pb} = -(r_{21pl}z_1 + r_{22pl}z_2 + R_{2ppl}). \end{cases} \quad (4)$$

Значения коэффициентов при неизвестных (рис. 7) для бортовой балки:

r_{11b} — момент во введенном защемлении от поворота на угол $\varphi = 1$;

r_{12b} — момент в защемлении от смещения линейной связи на единицу, $\delta = 1$;

r_{21b} — усилие в линейной связи от поворота защемления на угол $\varphi = 1$;

r_{22b} — усилие в линейной связи от ее смещения на единицу, $\delta = 1$;

R_{1pb} — момент в защемлении от внешних сил, в данном случае $R_{1pb} = 0$;

R_{2pb} — продольное усилие во введенной линейной связи от внешних сил;

для плиты:

r_{11pl} — момент во введенном защемлении от поворота на угол $\varphi = 1$;

r_{12pl} — момент в защемлении от смещения линейной связи на единицу, $\delta = 1$;

r_{21pl} — усилие в линейной связи от поворота защемления на угол $\varphi = 1$;

r_{22pl} — усилие в линейной связи от ее смещения на единицу, $\delta = 1$;

R_{1ppl} — момент во введенном защемлении от внешних сил;

R_{2ppl} — продольное усилие во введенной линейной связи от внешних сил.

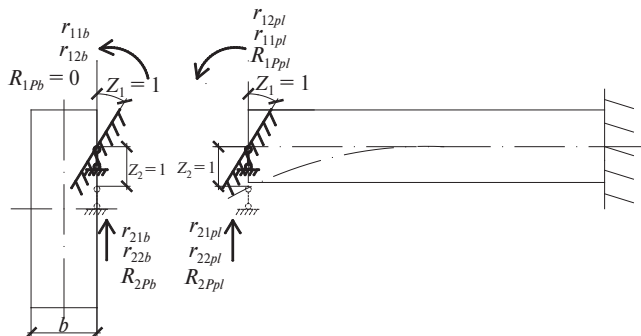


Рис. 7. Статическая схема для определения коэффициентов при неизвестных и грузовых членов в уравнениях метода перемещений

Найдем коэффициенты при неизвестных в уравнениях метода перемещений для бортовой балки (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты при неизвестных применительно к методу перемещений для бортовой балки

| Коэффициенты при неизвестных | Статическая схема |
|---|---|
| $\theta = 1 = \frac{r_{11b} \cdot 0,5 \cdot \frac{l}{2}}{GI_{tor,b}} \Rightarrow r_{11b} = \frac{4GI_{tor,b}}{l}$ | |
| $r_{12b} = r_{21b} = 0$ | — |
| По аналогии с δ_{22b} (см. раздел 2) $r_{22b} = 2 \cdot \frac{12D_b}{(l/2)^3} = \frac{192D_b}{l^3}$ | |
| $R_{1pb} = 0$ | Результирующая сила от внешней распределенной нагрузки на бортовую балку приложена центрально, поэтому не вызывает ее поворота и соответственно крутящего момента в балке |
| $R_{2pb} = \frac{q_{усл}l}{2}$ | |

Затем определим коэффициенты при неизвестных в уравнениях метода перемещений для плиты (табл. 4).

При решении системы уравнений (4), (5) получаем величины z_1 и z_2 . Крутящий момент M_{tor} и поперечную силу Q_{tor} находим по формулам:

$$\begin{aligned} M_{tor} &= r_{11pl}z_1 + r_{12pl}z_2 + R_{1ppl}; \\ Q_{tor} &= r_{21pl}z_1 + r_{22pl}z_2 + R_{2ppl}. \end{aligned}$$

Таблица 4

Коэффициенты при неизвестных
применительно к методу перемещений для плиты

| Коэффициенты при неизвестных | Статическая схема |
|--|-------------------|
| $r_{11pl} = \frac{4D_{pl}}{l \cdot k_{pl}}$ | |
| $r_{12pl} = \frac{6D_{pl}}{l^2 \cdot k_{pl}}$ | |
| $r_{21pl} = \frac{6D_{pl}}{l^2 \cdot k_{pl}}$ | |
| $r_{22pl} = \frac{12D_{pl}}{l^3 \cdot k_{pl}}$ | |
| $R_{1ppl} = \frac{q_{усл,пл} l^2}{12}$ | |
| $R_{2ppl} = \frac{q_{усл,пл} l}{2}$ | |

4. ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ БОРТОВОЙ БАЛКИ

На основе методики, изложенной в разделе 2, были проанализированы прогибы в центре пролетной полосы при различных конфигурациях бортовой балки по отношению к толщине плиты перекрытия. Для крайней ячейки безбалочного перекрытия пролетом 7,2 м, толщиной плиты перекрытия 220 мм, с колоннами сечением 400×400 мм были вычислены прогибы балок шириной 400 мм и высотой от 260 до 660 мм (т.е. для коэффициента отношения высоты балки к толщине плиты k от 1,18 до 3). Эпюры изгибающих моментов в пролетной полосе без бортовой балки и с балкой высотой 440 мм ($k = 2,0$) представлены на рис. 8 и 9. Расчеты показали, что при высоте 260 мм ($k = 1,18$), 330 мм ($k = 1,5$), 440 мм ($k = 2,0$), 550 мм ($k = 2,5$) и 660 мм ($k = 3,0$) бортовая балка по отношению к плите без бортовой балки уменьшает прогиб соответственно на 20, 39, 53, 59 и 62 %. Таким образом, оптимальная высота бортовой балки для данного перекрытия равна удвоенной толщине плиты при ширине, равной размеру сечения колонны. Дальнейшее увеличение высоты бортовой балки незна-

чительно влияет на уменьшение прогиба плиты и нецелесообразно из архитектурных соображений. Эпюра, представленная на рис. 10, получена благодаря распределению моментов в предельном состоянии по инструкции ЦНИПС [6]. Мы приводим ее для сравнения.

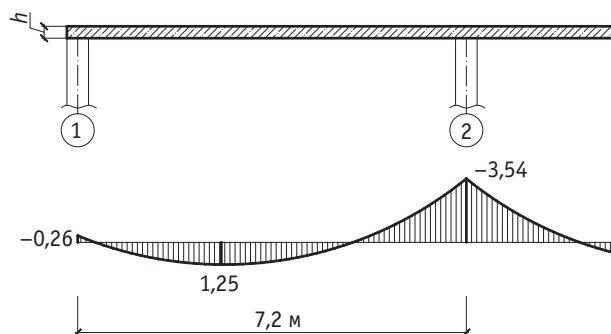


Рис. 8. Эпюра изгибающих моментов в пролетной полосе по принятой методике в случае защемления на второй опоре (без бортовой балки), тс-м

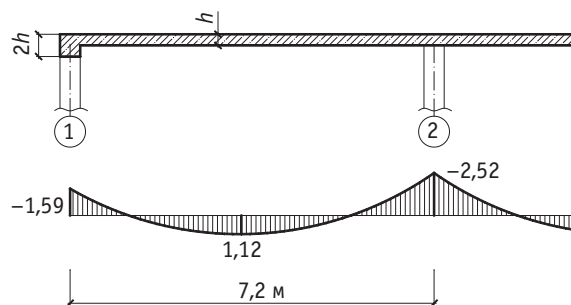


Рис. 9. Эпюра изгибающих моментов в пролетной полосе по принятой методике в случае защемления на второй опоре (бортовая балка высотой 440 мм), тс-м

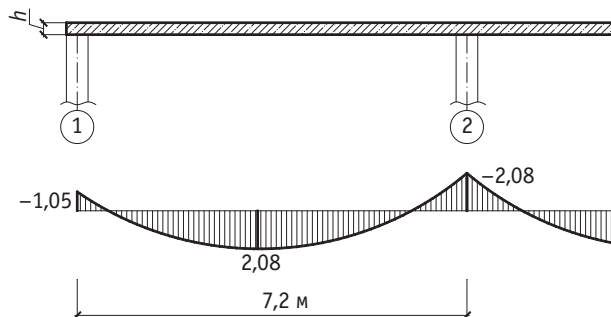


Рис. 10. Эпюра изгибающих моментов в пролетной полосе по инструкции ЦНИПС [6], тс-м

С целью снижения изгибающего момента и соответственно прогиба в пролете крайней ячейки целесообразно не только использовать бортовую балку, но и увеличить плотность армирования — это позволит повысить опорный момент на второй опоре. Поэтому в данной методике на второй опоре (точка А на рис. 3) принято защемление (см. рис. 8, 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бортовая балка позволяет снижать прогибы крайних ячеек перекрытия на 40–60 %, тем самым выравнивая их с прогибами средних ячеек. Это дает возможность увеличивать пролеты безбалочных перекрытий без значительного утолщения плиты и, таким образом, повышать гибкость архитектурно-планировочных решений и перепланировок в процессе эксплуатации железнодорожных зданий.

Несмотря на то что расчеты проведены без учета наличия трещин, сделанные предпосылки и рекомендации могут иметь практическое значение, если в реальных конструкциях при небольших нагрузках трещины отсутствуют. Кроме того, с теоретической точки зрения изложенный подход позволит находить изгибающие моменты по трещиностойкости и создать основу для дальнейшего подобного анализа, но уже с учетом трещин, что необходимо для решения проблемы перекрытий при больших пролетах и нагрузках.

Литература

1. Шипуля А. В., Скоробогатов С. М. Уточнение исходных параметров при подсчете прогибов безбалочных бескапитальных перекрытий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2012. № 4. С. 80–83. ISSN 2074-2932.
2. Shipulya A. V., Skorobogatov S. M. Refinement of deformative characteristics in determining of deflections in flat plate floor // Вестник УрГУПС. 2012. № 1 (13). С. 81–86. ISSN 2079-0392.
3. Скоробогатов С. М. Поверочные расчеты безбалочных бескапитальных монолитных железобетонных перекрытий по второй группе предельных состояний (прогибы, трещины) : учеб.-метод. пособие для бакалавров, инженеров и магистрантов специальности ПГС. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 92 с.
4. Hsu T. T. C., Mo Y. L. Unified Theory of Concrete Structures / University of Houston, USA. NY : John Wiley & Sons, 2010. 521 p.
5. Голышев А. Б. Проектирование железобетонных конструкций : справ. пособие. Киев : Будівельник, 1990. 543 с.
6. Инструкция по расчету и проектированию безбалочных перекрытий (проект) / ЦНИПС. М. : Госстройиздат, 1933.

References

1. Shipulya A. V., Skorobogatov S. M. Utochnenie iskhodnykh parametrov pri podschete progibov bezbalochnykh beskapitelnykh perekrytiy [Refinement of initial parameters in analysis of deflections of beamless flat floor slabs] // Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN. 2012. № 4. P. 80–83. ISSN 2074-2932.
2. Shipulya A. V., Skorobogatov S. M. Refinement of deformative characteristics in determining of deflections in flat plate floor // Herald of USURT. 2012. № 1 (13). P. 81–86. ISSN 2079-0392.
3. Skorobogatov S. M. Poverochnye raschety bezbalochnykh beskapitelnykh monolitnykh zhelezobetonnykh perekrytiy po vtoroy grappe predelnykh sostoyaniy (progiby, treschiny) : ucheb.-metod. posobie dlya bakalavrov, inzhenerov i magistrantov spetsialnosti PGS [Checking calculations of beamless flat monolithic concrete floors on the second group of limiting states (deflections, cracks) : textbook for bachelors, engineers and undergraduates majoring in industrial and civil engineering]. Ekaterinburg : Izd-vo USURT, 2012. 92 p.
4. Hsu T. T. C., Mo Y. L. Unified Theory of Concrete Structures / University of Houston, USA. NY : John Wiley & Sons, 2010. 521 p.
5. Golyshev A. B. Proektirovaniye zhelezobetonnykh konstruktсий : sprav. posobie [Design of concrete structures : a handbook]. Kiev : Budivelnik, 1990. 543 p.
6. Instruktziya po raschetu i proektirovaniyu bezbalochnykh perekrytiy (proekt) [Instructions for calculation and design of beamless floors (draft)] / TsNIPS. M. : Gosstroyizdat, 1933.

УДК 629.4.043.2

Игорь Владимирович Харитонов, аспирант кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Борис Сергеевич Сергеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),
Александр Дмитриевич Волосников, ведущий инженер-конструктор Научно-производственного объединения автоматики имени академика Н. А. Семихатова (НПО автоматики), Екатеринбург

АНАЛИЗ ОСВЕЩЕННОСТИ КАБИНЫ МАШИНИСТА МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Igor Vladimirovich Kharitonov, graduate student, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Boris Sergeyevich Sergeev, DSc in Engineering, Professor, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Alexander Dmitriyevich Volosnikov, Leading Design Engineer, Research and Production Association of Automation named after Academician N. A. Semikhatov (NPO Avtomatiki), Ekaterinburg

Analysis of driver's cab lighting in a shunting locomotive

Аннотация

Рассмотрены особенности освещенности кабины маневрового тепловоза, который обладает специфическими эксплуатационными свойствами по сравнению с поездным локомотивом. Приведены результаты моделирования условий распространения и отражения светового потока, разработаны предложения, позволяющие исключить те случаи отражения, которые могут нарушить безопасность движения.

Ключевые слова: маневровый локомотив, светильник, освещение кабины локомотива, светодиоды, нормы освещенности, параметры отражения света.

Summary

The paper examines the specifics of lighting in the cab of a shunting locomotive, which has specific performance characteristics as compared to train locomotives. The results of simulation of conditions and reflection of light flux are given; proposals are developed to exclude those reflections that can disrupt traffic safety.

Keywords: shunting locomotive, lamp, locomotive cab lighting, LEDs, lighting standards, light reflection parameters.

Особенностью маневровых локомотивов с низким капотом является возможность обеспечить круговой обзор (360°) для машиниста при выполнении станционных работ по формированию поездных единиц. В полной мере таким свойством обладает новый локомотив ТЭМ9Н (рис. 1). При этом для разрабатываемых локомотивов требуется соблюдение норм освещенности кабины машиниста и отсутствие отражений света на внешних стеклах кабины и на экранах мониторов пульта управления [1] (табл. 1).



Рис. 1. Внешний вид тепловоза ТЭМ9Н

Другой особенностью локомотива ТЭМ9Н является использование светодиодных светильников в качестве источника освещения кабины, которые характеризуются значительно большим сроком службы [2] и малым потреблением электроэнергии [3, 4]. Соответственно у них принципиально новая конструкция: вместо

точечного источника излучения — светильники распределенного типа, состоящие из группы пространственно разнесенных светодиодов. Это создает некоторые трудности размещения осветительных приборов в кабине локомотива с точки зрения исключения отражений в элементах ее конструкции.

Таблица 1

Показатели искусственного освещения кабины машиниста [1]

| Показатель | Нормативное значение |
|--|--------------------------|
| Освещенность на пульте управления, лк: яркий свет тусклый свет | От 20 до 60 От 2 до 9 |
| Неравномерность освещенности (отношение максимальной освещенности к минимальной) | Не более 2:1 |
| Зеркальное отражение в стеклах окон кабины машиниста приборов, ламп подсветки приборов, светильников общего, аварийного и местного освещения | Нет |

Выполняя работу, машинист маневрового локомотива может сидеть в кресле или, если это необходимо, стоять.

На рис. 2 представлен продольный разрез пульта управления, где вертикальная поверхность монитора прикрыта защитной конструкцией.

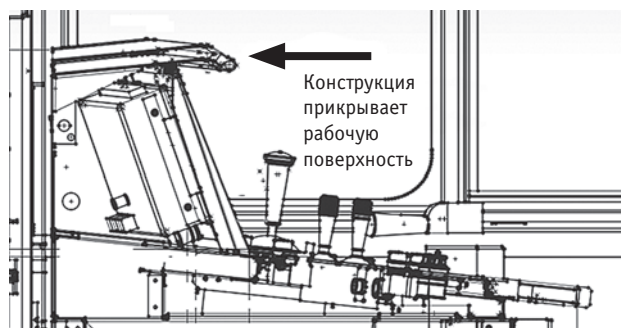


Рис. 2. Продольный разрез пульта управления

Кривая силы света, т.е. освещенности, формируется рядом светодиодных светильников с матовыми рассеивателями. Применение дополнительной оптики, которая бы сделала освещение более направленным или более рассеянным, нецелесообразно, так как в этом случае осветительный прибор не будет универсальным для различных конструкций кабин и локомотивов.

Чтобы обеспечить соблюдение норм освещенности (см. табл. 1), можно воспользоваться несколькими методами расчета. Наиболее простым является расчет освещенности по удельной мощности. В соответствии с ним мощность ламп для освещения заданной площади помещения определяется по формуле

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{уд}} F, \quad (1)$$

где $P_{\text{уд}}$ — удельная мощность на единицу площади, Вт/м²;
 F — площадь освещаемого помещения, м².

Удельная мощность зависит от характеристики освещаемого помещения, типа и мощности ламп, типа светильников, высоты подвеса и размещения светильников.

Недостатком данного метода является невысокая точность определения характеристик освещенности.

Метод расчета коэффициента использования предназначен для общего освещения в закрытых помещениях при симметричном расположении светильников. Расчет освещения в помещении начинают с размещения светильников. При этом учитывают конфигурацию помещения и отражение света от стен и потолков.

Определяют расчетный световой поток одной лампы для обеспечения требуемой в соответствии с нормами освещенности:

$$\Phi = \frac{E_n K_{\text{зап}} F z}{\eta}, \quad (2)$$

где E_n — нормированная освещенность, лк;

$K_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, учитывающий старение и загрязненность источников света и арматуры, загрязнение стен и потолка;

F — площадь освещаемой поверхности, м²;

n — число светильников (как правило, намечается до расчета);

z — коэффициент минимальной освещенности,

$$z = \frac{E_{\text{ср}}}{E_n}, \quad (3)$$

$E_{\text{ср}}$ — средняя освещенность, лк;

η — коэффициент использования светового потока источника света, зависящий от индекса помещения,

$$\eta = \frac{F}{h(L + B)}, \quad (4)$$

h, L, B — высота, длина и ширина помещения соответственно, м.

Недостатком данного метода является неточность выявления минимальной освещенности и мест ее проявления, поэтому он широко используется только для определения средней освещенности горизонтальных поверхностей.

Точный метод расчета применяется для общего равномерного и локального освещения, местного освещения независимо от расположения освещаемой поверхности при светильниках прямого света. В соответствии с этим методом освещенность определяется в каждой точке рассчитываемой поверхности, относительно каждого источника освещения.

При расчете освещения горизонтальных и вертикальных поверхностей в общем случае пользуются монограммами Ратнера [5], где освещенность E зависит от светораспределения светильников, расчетной высоты и расстояния проекции светильника на рабочую поверхность до контрольной точки. Недостаток этого метода — большое количество однотипных расчетов, которые выполняются графическим способом, не поддающимся автоматизации компьютерными методами.

Наиболее рационально для расчета освещенности использовать пакеты программ, в частности Dialux, Optisworks, TracePro, моделирующие функционирование оптических систем.

Для применения этих программ необходимо иметь оптическую модель светильника. Моделирование сводится к построению пространственной модели кабины управления, верному выбору коэффициентов отражения поверхностей, а также к корректному заданию рабочей поверхности (поверхности пульта управления).

Форма пульта в виде полудуги обеспечивает улучшение равномерности освещенности на его краях, так как уровень освещенности обратно пропорционален квадрату расстояния от отражаемой поверхности до источника света. Наличие рабочей зоны на вертикальной поверхности, прикрытой частью конструкции (см. рис. 2), приводит к тому, что светильник нельзя размещать непосредственно над пультом управления — необходимо отодвигать его в сторону машиниста.

Практический пример оптического моделирования в среде Dialux, полученный при проектировании кабины локомотива ТЭМ9Н, показан на рис. 3, где уровни освещенности пульта соответствуют нормам [1].

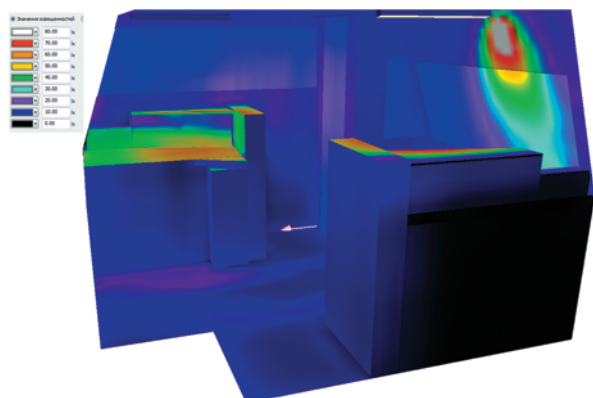


Рис. 3. 3D-моделирование интенсивности освещения кабины локомотива

Наличие широкого лобового окна в тепловозах ТЭМ9Н является одной из причин появления отражений (рис. 4). Следует заметить, что в тепловозах с высоким капотом не возникает отражений заднего светильника, так как на месте стекла в них находится обшивка.

При проектировании тепловоза ТЭМ9Н принята конструкция с плоскими стеклами, которые устанавливаются перпендикулярно полу. Причина такого выбора — необходимость выполнить конструктивный размер 1-ВМ.

Наличие и отсутствие отражений связано с положением глаз машиниста относительно лобового стекла. Отражения формируются из лучей света от светильника, падающих под таким углом на лобовое стекло, что, отражаясь, они попадают в глаза машиниста. Для того чтобы установить наличие отражений в лобовом окне от светильника, необходимо выявить наихудший случай положения машиниста. В первом приближении достаточно воспользоваться законом отражения света и плоским чертежом кабины машиниста.



Рис. 4. Отражение от светильников в лобовом стекле при положении машиниста стоя

Рабочим положением машиниста считается, когда он находится в кресле (сидит) или перед креслом (стоит). Рассмотрим такие случаи: 1 — высокий машинист стоит, 2 — низкий машинист сидит. Ростовые размеры машиниста взяты в соответствии с нормами на проектирование кабин и оборудования моторвагонного подвижного состава железнодорожного транспорта.

На рис. 5 представлен разрез кабины для двух вышеописанных случаев. Понятно, что в положении 2 машинист способен увидеть большую часть потолка, нежели в положении 1.

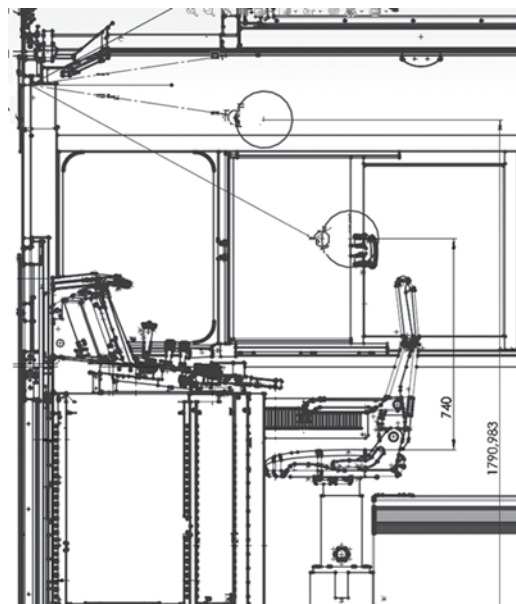


Рис. 5. Наихудшее рабочее положение машиниста: отражение от стекла позволяет видеть весь потолок кабины

Отклонение стекла (положительный наклон) на 15° (рис. 6) дает возможность исключить отражение от потолочных светильников в глаза машиниста.

Стекла можно придать отрицательный наклон. В данном случае худшим будет случай 1, когда высокий машинист стоит. Согласно построениям, такое решение менее эффективно: при угле 15° машинист видит большую часть потолка, а выбор места установки светильников остается сложным.

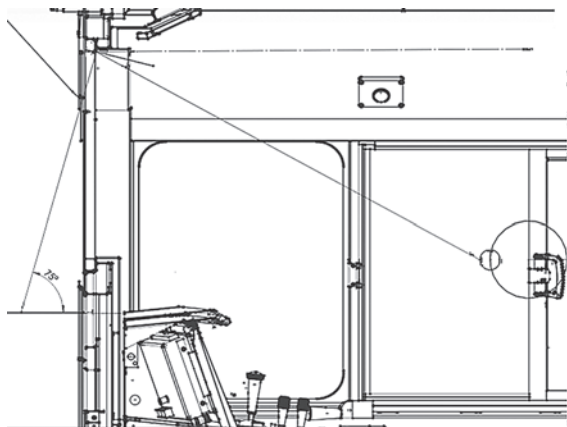


Рис. 6. Отклонение стекла (положительный наклон) на 15°

Таким образом, техническое решение в виде стекол кабины, установленных перпендикулярно полу, обусловленное необходимостью выполнить требования габарита кабины управления, послужило нарушением нормативного условия: «Лобовые окна должны обеспечивать локомотивной бригаде в дневное и ночное время и при всех погодных условиях хороший обзор, без искажения цветов сигналов светофоров. Угол их установки должен подбираться с учетом исключения отражения в них наружных световых сигналов и внутренних источников света» [6].

Чтобы исключить попадание света от светильника в пределы зоны видимости машиниста, необходимо вывести из этой зоны источники света и источники отраженного света.

Для решения данной технической задачи разработан корпус светильника специальной формы (рис. 7). Особенность конструкции заключается в том, что корпус светильника скрывает источник света и ограничивает угол распространения света. Кроме того, необходимо введение зеркальных накладок вокруг активной поверхности светильника.

Моделирование показало, что геометрически (рис. 8) свет от стекла, попадая на зеркальную поверхность, отражается не в активную поверхность светильника, а в пол. То есть отражение светильника в окне пропадает.

Таким образом, оптическое моделирование в среде Dialux позволило выбрать наиболее оптимальное размещение светильников в кабине машиниста, соответствующее нормам [1] (см. рис. 3), при котором отражения в окне полностью исключаются.

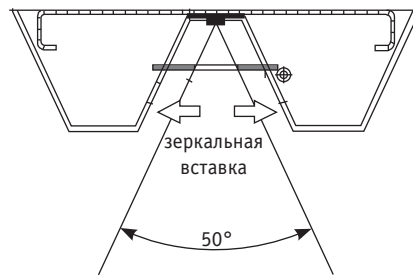


Рис. 7. Конструкция светильника

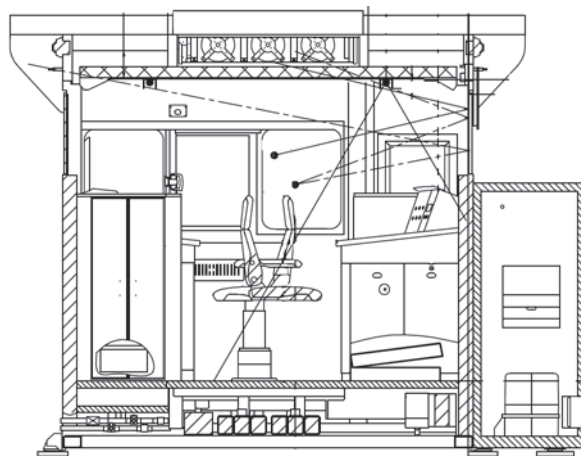


Рис. 8. Геометрическое моделирование наличия отражений при разработанной конструкции светильника

ВЫВОДЫ

1. Для решения вопросов общего освещения кабины управления крайне важна геометрия пультов локомотива, а также угол наклона внешних стекол кабины.
2. Если невозможно обеспечить отражение от светильника в лобовых стеклах кабины управления, необходимо помимо ограничения угла распространения света ввести зеркальные вставки — они обеспечивают отклонение отраженного от стекла луча в сторону пола.
3. Кардинальным решением, которое позволит исключить отражение светильников в лобовых стеклах, является наклон стекол на 15° . Однако это потребует перекомпоновки кабины локомотива.

Литература

1. НБ ЖТ ЦТ 02-98. Тепловозы. Нормы безопасности / 2-я ред. М. : ОАО «РЖД», 1998. 56 с.
2. Ададуров С. Е., Розенберг Е. Н., Мурашова М. А. Концепция комплексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» // Автоматика, связь, информатика. 2009. № 2. С. 2–5. ISSN 0005-2329.
3. Давиденко Ю. И. Современная схемотехника в освещении. СПб. : Наука и техника, 2008. 320 с.
4. Оськина М. А., Сергеев Б. С., Сисин В. А. Направления совершенствования светодиодных светофоров // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 66–68. ISSN 1815-9400.
5. Тищенко Г. А. Осветительные установки. М. : Высшая школа, 1984. 247 с.
6. СП 2.5.1336-03. Санитарные правила по проектированию и реконструкции локомотивов и специального подвижного состава железнодорожного транспорта. Екатеринбург : УралЮриЗдат, 2003. 23 с.

References

1. NB ZHT TST 02-98. Teplovozy. Normy bezopasnosti [Locomotives. Safety standards] / 2-ya red. M. : OAO «RZhD», 1998. 56 p.
2. Adadurov S. E., Rozenberg E. N., Murashova M. A. Kontseptsiya kompleksnoy programmy «Vnedrenie svetodiodnoy tekhniki v OAO «RZhD» [Concept of an integrated program «Implementation of LED products at JSC Russian Railways»] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2009. № 2. P. 2–5. ISSN 0005-2329.
3. Davidenko Yu. I. Sovremennaya skhemotekhnika v osveschenii [Modern lighting circuitry]. SPb. : Nauka i tekhnika, 2008. 320 p.
4. Oskina M. A., Sergeev B. S., Sisin V. A. Napravleniya sovershenstvovaniya svetodiodnykh svetoforov [Areas for improvement of LED traffic lights] // Transport of the Urals. 2013. № 3 (38). P. 66–68. ISSN 1815-9400.
5. Tischenko G. A. Osvetitelnye ustanovki [Lighting installations]. M. : Vysshaya shkola, 1984. 247 p.
6. SP 2.5.1336-03. Sanitarnye pravila po proektirovaniyu i rekonstruktsii lokomotivov i spetsialnogo podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Sanitary regulations for the design and reconstruction of locomotives and special railway rolling stock]. Ekaterinburg : UralYurIzdatt, 2003. 23 p.

УДК 621.317.7

Владимир Николаевич Костюков, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО НПЦ «Динамика», Омск,
Алексей Евгеньевич Цурпаль, научный сотрудник ООО НПЦ «Динамика», Омск,
Андрей Валерьевич Зайцев, научный сотрудник ООО НПЦ «Динамика», Омск

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРАЦИИ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Vladimir Nikolayevich Kostyukov, DSc in Engineering, Professor, General Director of LLC NPC «Dinamika», Omsk,
Alexey Evgenyevich Tsurpal, Research Officer, LLC NPC «Dinamika», Omsk,
Andrey Valeryevich Zaytsev, Research Officer, LLC NPC «Dinamika», Omsk

A device for experimental studies of vibration of rolling stock components during operation

Аннотация

Представлены результаты разработки экспериментальной установки, применяемой в рамках комплексной программы исследования виброакустических процессов для получения данных о вибрации узлов механической части подвижного состава, работающего в реальных условиях эксплуатации. Установка обеспечивает возможность длительной непрерывной потоковой записи сигналов с первичных преобразователей, в частности с вибродатчиков, в полосе до 900 кГц.

Результаты анализа данных, полученных с помощью экспериментальной установки, положены в основу алгоритмов диагностирования агрегатов подвижного состава, реализованных в бортовых системах мониторинга технического состояния КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-3, которыми оснащается современный подвижной состав.

Ключевые слова: электропоезд, вибрация, мониторинг состояния, спектр.

Summary

The paper presents the results of development of an experimental device used within the framework of an integrated program of research of vibroacoustic processes to obtain data on vibration of mechanical components of rolling stock working in real operating conditions. The device enables prolonged continuous stream recording of signals from transmitters, in particular, from vibration sensors in the band to 900 kHz.

Results of the analysis of data obtained using the experimental device have been used as a basis for train component diagnosis algorithms, implemented in on-board condition monitoring systems COMPACS®-EXPRESS-3, installed on modern rolling stock.

Keywords: train, vibration, condition monitoring, spectrum.

Повышение безопасности и надежности транспортных систем, в том числе железнодорожного транспорта, все чаще ассоциируется с проведением периодического или непрерывного диагностирования технического состояния наиболее важных с этой точки зрения узлов подвижного состава. Понятие «непрерывное диагностирование» в современной литературе получило название «мониторинг технического состояния» [1].

Организация мониторинга технического состояния подвижного состава на практике далеко не тривиальная задача, но требующая обязательного решения. Например, для достижения динамической ошибки пропуска опасного состояния оборудования на уровне 1 % необходимо выполнять диагностирование с интервалом не более 2 ч, тогда как для ответственного оборудования подвижного состава приемлемый уровень ошибки составляет всего лишь 0,1 %, что требует постановки диагноза с интервалом 11 мин [2, 3].

Наибольшие трудности при организации такого мониторинга представляет автоматическое достоверное распознавание в реальном времени неисправного состояния узла подвижного состава на фоне сильных помех, которые непрерывно сопровождают процесс эксплуатации.

Наличие таких факторов, как переменные скоростные и нагрузочные режимы, периодические стыки и случайные неровности пути, стало основанием для формирования мнения о том, что объективная виброакустическая диагностика технического состояния роторного механического оборудования подвижного состава в процессе эксплуатации труднодостижима, а подчас и невозможна [4].

Цель настоящей работы — установить возможность достоверной оценки технического состояния узлов роторных агрегатов механической части подвижного состава в процессе эксплуатации при приемлемой стоимости единичного акта диагностирования. Для достижения этой цели требуется разработать программу экспериментальных исследований виброакустических

процессов, а также создать экспериментальную установку для измерения сигналов.

Один из важнейших элементов такой программы — получение сигналов вибрации с узлов подвижного состава в процессе эксплуатации с высокими точностными характеристиками, позволяющими охватить широкий спектр частот и амплитуд сигналов, порождаемых элементами узлов и агрегатов и их взаимодействием с железнодорожным полотном.

Для этого была разработана экспериментальная измерительная установка, отвечающая таким, в целом весьма противоречивым требованиям, как:

надежность работы при перепадах температуры, повышенной вибрации, неустойчивости питающего напряжения;

устойчивость первичных преобразователей (датчиков вибрации), устанавливаемых непосредственно на исследуемые узлы, к высоким динамическим нагрузкам, превышающим 100g; высокие метрологические характеристики;

минимальное вмешательство в конструкцию подвижного состава;

автономная запись сигналов с первичных преобразователей, а также частоты вращения и параметров режима ведения поезда.

В основу установки заложен уникальный измерительный модуль 3541, разработанный и серийно выпускаемый НПЦ «Динамика» [5]. Он предназначен для измерения и аналого-цифровой обработки сигналов, в том числе виброакустических и акусто-эмиссионных, передачи цифровых данных в систему их сбора по интерфейсу Ethernet. Модуль имеет 8 каналов аналого-цифрового преобразования с результирующей разрядностью 16 бит и полосой пропускания до 900 кГц.

Создание подобного класса устройств стало возможным в сравнительно недавнее время — после появления новейших коммерчески доступных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) без встроенных процессорных ядер и трансиверов. Использование таких ПЛИС наложило некоторые ограничения, обусловленные необходимостью выделения большого объема логических ячеек на реализацию интерфейсов связи с управляющими устройствами и интерфейсов подключения внешней памяти.

Однако творческая инженерная мысль не стоит на месте, и наиболее перспективным направлением в создании высокоэффективных измерительных устройств стало совместное применение ПЛИС и сигнальных процессоров, например 16-разрядного Blackfin, явившегося результатом усилий фирм Analog Devices и Intel по разработке новой архитектуры Micro Signal Architecture ADI. Особенность этой архитектуры — сочетание в одном микропроцессоре возможностей цифровой обработки сигналов и RISC-подобного (неполного) набора команд.

Распределение функций между ПЛИС (FPGA) и сигнальным процессором (Blackfin) позволило создать многоканальные высокопроизводительные измерительные устройства (рис. 1), в которых на ПЛИС возлагаются функции управления аналого-цифровыми преобразователями (ADC) и предварительной обработки получаемых данных: цифровая фильтрация, выделение вибрационных или акустических импульсов и расчет их параметров, организация потока данных для приема по каналу DMA (прямого доступа к памяти) и пр. На долю процессора возло-

жена реализация функций связи с управляющими устройствами по интерфейсу Ethernet, поддержка web-интерфейса, хранение полученных от ПЛИС данных во внешней памяти, окончательная обработка данных.

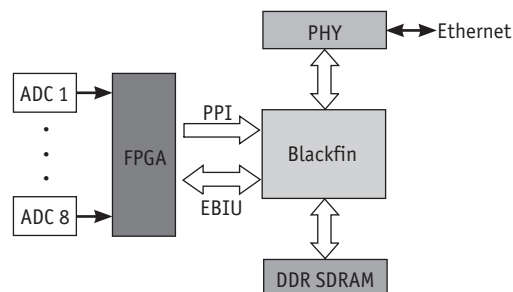


Рис. 1. Упрощенная структурная схема измерительного устройства на базе ПЛИС и микропроцессора Blackfin:

ADC1... ADC8 — блоки аналого-цифровых преобразователей; FPGA — программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС); Blackfin — цифровой процессор обработки сигналов (сигнальный процессор); DDR SDRAM — память хранения временной реализации сигналов; PHY — физический уровень интерфейса Ethernet; PPI — параллельный интерфейс; EBIU — интерфейс внешней шины

Отличительной особенностью разработанного в соответствии с вышеописанной архитектурой измерительного модуля 3541, внешний вид которого приведен на рис. 2, является возможность непрерывной равномерной (без пропусков данных) регистрации сигналов.

Примененные в модуле 24-разрядные аналого-цифровые преобразователи производства Analog Devices позволяют получать временную реализацию с разрешением в 16 «чистых» разрядов частотой дискретизации до 2 МГц.



Рис. 2. Измерительный модуль 3541

Основные технические характеристики модуля 3541 приведены в табл. 1.

Для записи сигналов вибрации с узлов подвижного состава в процессе движения на вагоне электропоезда была смонтирована экспериментальная установка (рис. 3). При размещении на вагоне измерительный модуль 3541 (5) проводным каналом связи Ethernet подключается к малогабаритному персональному компьютеру промышленного исполнения (ПЭВМ) (4). Для измерения вибрации в качестве датчиков используются пьезоэлектрические виброакселерометры (1), имеющие высокую резонансную частоту, которые устанавливаются на буксовые узлы колесных пар и подшипниковые щиты тяговых электродвигателей (ТЭД) [6]. Для измерения частоты вращения колесных пар применяются вихревые датчики (2), работающие с магнитными метками, закрепленными на оси колесной

пары. Измерение напряжения на проводах цепей управления с помощью соответствующего блока (3) позволяет в процессе анализа сигналов определять режимы ведения электропоезда в каждый момент времени.

Таблица 1

Технические характеристики измерительного модуля 3541

| Характеристика | Значение |
|---|----------------------------------|
| Количество измерительных каналов | 8 |
| Тип входа | Дифференциальный |
| Разрядность АЦП (результатирующая), бит | 16 |
| Диапазон частот дискретизации АЦП по всем каналам одновременно, кГц | 1–2000 |
| Полоса пропускания при максимальной частоте дискретизации (по уровню –3 дБ), кГц | 0–900 |
| Динамический диапазон, дБ, не менее | 82 |
| Диапазон входного сигнала: канала измерения напряжения, мВ канала измерения тока, мА | От –1000 до +1000 От –5 до +5 |
| Относительная основная погрешность: канала измерения напряжения, %, не более канала измерения тока, %, не более | 0,05 0,1 |
| Напряжение питания модуля, В | 10–18 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 12 |
| Интерфейс | Ethernet, 100 Мбит/с |

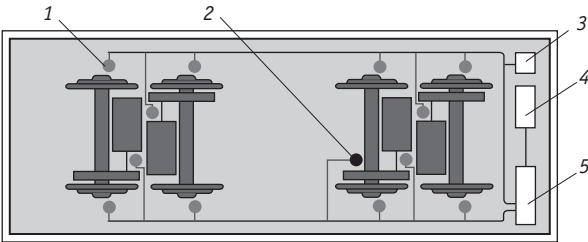


Рис. 3. Схема размещения установки на моторном вагоне электропоезда:

1 — датчик вибрации; 2 — датчик частоты вращения;
3 — блок определения режимов ведения поезда; 4 — ПЭВМ;
5 — измерительный модуль 3541

С помощью смонтированной экспериментальной установки в течение нескольких месяцев эксплуатации периодически в автоматическом режиме осуществлялась параллельная запись сигналов вибрации со всех узлов. Эксперимент проводили на электропоездах, эксплуатируемых на разных участках дороги.

В процессе работы по сбору экспериментального материала на основе анализа полученных данных были выявлены узлы, имевшие существенно большие уровни вибрации. Такие узлы были приняты за условно неисправные.

На рис. 4 в качестве примера представлены спектрограммы сигналов виброускорения длительностью 300 с с отображением по шкале частоты до 18 кГц, разбитой на 5 октавных полос. Сигналы получены с исправного и условно неисправного узлов — тяговых электродвигателей 1 и 4 соответственно.

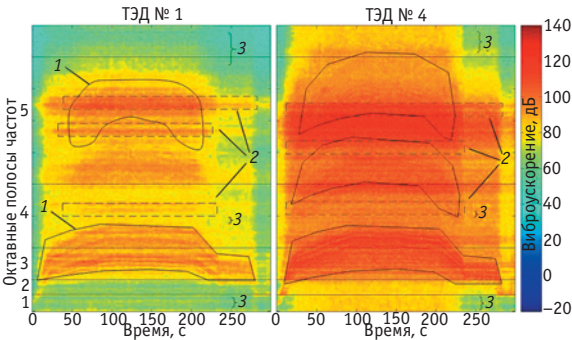


Рис. 4. Спектрограммы сигналов виброускорения, полученных с ТЭД

Как видно из рис. 4, сигналы виброускорения в различных октавных полосах имеют схожий характер, однако амплитуды дискретных и шумовых частотных составляющих при этом существенно отличаются. Так, можно выделить несколько областей:

- 1 — с частотными составляющими, частоты которых пропорциональны частоте вращения агрегата;
- 2 — с частотными составляющими, амплитуды которых зависят от частоты вращения агрегата;
- 3 — области, заполняющие все оставшееся пространство, с частотными составляющими, амплитуды и частоты которых не зависят от частоты вращения агрегата (шумовая компонента).

Из рис. 4 также видно, что для тяговых электродвигателей с различным техническим состоянием уровень вибрации в частотных полосах 3, 4, 5 существенно отличается. Следует отметить, что на уровень вибрации большое влияние оказывают скорость движения и режимы работы подвижного состава, причем для узлов с разным техническим состоянием характер этого влияния различен.

Анализ данных с помощью специализированных программных средств позволил установить возможность выделения из сигналов вибрации, полученных в условиях реальной эксплуатации подвижного состава, дискретных частотных составляющих, соответствующих конкретным видам дефектов подшипников, зубчатых передач и др.

Выделение указанных составляющих осуществляется по спектру огибающей сигнала в определенной полосе частот. Так, на рис. 5 приведены спектрограммы огибающей сигнала вибрации тех же тяговых двигателей, что и на рис. 4, для третьей полосы частот.

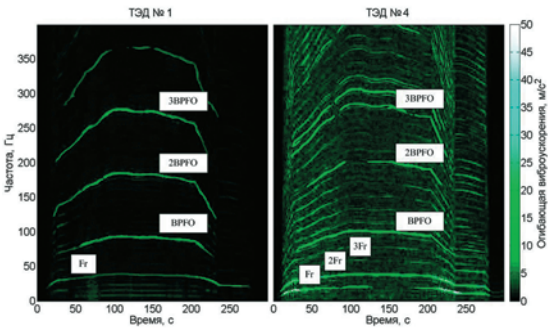


Рис. 5. Спектрограммы огибающей сигнала вибрации ТЭД для третьей полосы частот

Из рис. 5 видно, что в огибающей сигнала вибрации проявляются дискретные составляющие, связанные с соответствующими частотами дефектов, в данном случае — с частотой дефекта внешней обоймы подшипника (BPFO) тягового электродвигателя с редукторной стороны и частотой вращения агрегата (Fr). Дискретные составляющие спектра огибающей сигнала вибрации, соответствующие частотам проявления дефектов, проявляются в различных скоростных режимах.

Выводы

1. Результаты проведенных исследований показали возможность выделения частотных составляющих в сигналах вибрации, соответствующих различным неисправностям узлов, на фоне сильных помех от взаимодействия экипажной части подвижного состава с рельсовой колеей в условиях переменных скоростных и нагрузочных режимов работы подвижного состава.

2. Установлены зависимости значений амплитуд частотных составляющих от скоростей и режимов движения, закономерности проявления дефектов в спектре огибающей в различных частотных полосах, влияния воздействий от стыка и неровностей рельсовой колеи на амплитудно-частотный состав сигна-

лов вибрации. Полученные результаты [7] положены в основу базы знаний, реализованной в автоматической экспертной системе бортовых систем мониторинга технического состояния оборудования КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС-3, которыми оснащаются современные электропоезда [8].

3. Автоматическая экспертная система позволяет достоверно распознавать дефекты на основе вектора ортогональных диагностических признаков [9] и своевременно, в темпе измерения признаков, информировать персонал, эксплуатирующий подвижной состав, о зарождающихся и развивающихся неисправностях, создавая, таким образом, существенный запас времени (3–6 месяцев) для принятия взвешенного решения о нормализации состояния узла.

4. Результаты исследований и опыт эксплуатации бортовых систем мониторинга на электропоездах однозначно подтверждают высокую эффективность автоматической оценки технического состояния узлов подвижного состава в процессе эксплуатации с помощью методов виброакустической диагностики, возможность выявления дефектов на ранней стадии развития и наблюдения за процессом деградации состояния узла от момента зарождения дефекта до стадии максимальной выработки ресурса узла при сохранении ремонтпригодности.

Литература

1. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. М. : Машиностроение, 2002. 204 с.
2. Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация МВПС на основе мониторинга в реальном времени / В. Н. Костюков, С. В. Сизов, В. П. Аристов, Ан. В. Костюков // Наука и транспорт, 2008. С. 8–13.
3. Непрерывный мониторинг состояния моторвагонного подвижного состава / В. Н. Костюков, С. В. Сизов, В. П. Аристов, Ал. В. Костюков // Железнодорожный транспорт. 2008. № 6. С. 41–42. ISSN 0044-4448.
4. Азовцев А. Ю. Опыт вибрационной диагностики подвижного состава ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] // Ассоциация ВАСТ : [сайт]. 2010. URL: <http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Diagnostika%20podvizhnogo%20sostava.pdf> (дата обращения: 16.02.2011).
5. Модуль 3541 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dynamics.ru/products/controllers-moduls-sensors/modul-3541/> (дата обращения: 10.02.2014).
6. Пат. 2138793 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/00, 13/04. Устройство для крепления вибропреобразователя / Костюков В. Н., Горшечников О. П., Мелинг А. Я. № 97121755 ; заявл. 24.12.97; опубл. 27.09.99, Бюл. № 28п.
7. Анализ вибрационной активности тяговых электродвигателей электропоездов для целей диагностики / В. Н. Костюков, А. Е. Цурпаль, В. В. Басакин и др. // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии : матер. IX междунар. науч.-техн. конф. Омск : ОмГУПС, 2013. С. 214–221.
8. Автоматизированная система управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией и ремонтом оборудования подвижного состава пригородного пассажирского комплекса / В. Н. Костюков, Ал. В. Костюков, А. В. Щелканов, Д. В. Казарин // Техника железных дорог. 2013. № 1. С. 62–66.
9. Костюков В. Н., Костюков Ал. В. Ортогональность параметров виброускорения, виброскорости и виброперемещения в задачах вибродиагностики // Контроль. Диагностика. 2008. № 11. С. 6–15.

References

1. Kostyukov V. N. Monitoring bezopasnosti proizvodstva [Industrial safety monitoring]. M. : Mashinostroenie, 2002. 204 p.
2. Bezopasnaya resursosberegayushchaya ekspluatatsiya MВРС na osnove monitoringa v realnom vremeni [Safe resource-saving operation of multiple-unit train rolling stock based on real-time monitoring] / V. N. Kostyukov, S. V. Sizov, V. P. Aristov, An. V. Kostyukov // Nauka i transport, 2008. P. 8–13.
3. Nepriernyy monitoring sostoyaniya motorvagonnogo podvizhnogo sostava [Continuous condition monitoring of multiple unit rolling stock] / V. N. Kostyukov, S. V. Sizov, V. P. Aristov, Al. V. Kostyukov // Zheleznodorozhnyy transport. 2008. № 6. P. 41–42. ISSN 0044-4448.
4. Azovtsev A. Yu. Opyt vibratsionnoy diagnostiki podvizhnogo sostava ОАО «RZhD» [JSC Russian Railways' experience of rolling stock vibration diagnosis]. [Electronic resource] // Assotsiatsiya VAST : [sayt]. 2010. URL: <http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Diagnostika%20podvizhnogo%20sostava.pdf> (date accessed: 16.02.2011).
5. Modul 3541 [Module 3541]. [Electronic resource]. URL: <http://www.dynamics.ru/products/controllers-moduls-sensors/modul-3541/> (date accessed: 10.02.2014).
6. Pat. 2138793 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01 M 15/00, 13/04. Ustroystvo dlya krepleniya vibropreobrazovatelya [An apparatus for mounting vibration transducer] / Kostyukov V. N., Gorshechnikov O. P., Meling A. Ya. № 97121755 ; zayavl. 24.12.97 ; opubl. 27.09.99, Byul. № 28p.
7. Analiz vibratsionnoy aktivnosti tyagovykh elektrodvigately elektropoezdov dlya tseley diagnostiki [Analysis of vibratory activity of electric traction motors for diagnostic purposes] / V. N. Kostyukov, A. E. Tsurpal, V. V. Basakin i dr. // Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii kollektornykh elektromekhanicheskikh preobrazovately energii : mater. IX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Omsk : OmGUPS, 2013. P. 214–221.
8. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya bezopasnoy resursosberegayushey ekspluatatsiy i remontom oborudovaniya podvizhnogo sostava prigorodnogo passazhirskogo kompleksa [Automated control system for safe resource-saving operation and maintenance of commuter complex rolling stock] / V. N. Kostyukov, Al. V. Kostyukov, A. V. Schelkanov, D. V. Kazarin // Tekhnika zheleznikh dorog. 2013. № 1. P. 62–66.
9. Kostyukov V. N., Kostyukov Al. V. Ortogonalnost parametrov vibrouskoreniya, vibroskorosti i vibroperemescheniya v zadachakh vibrodiagnostiki [Orthogonality of vibration acceleration, vibration speed and vibration displacement parameters in vibration diagnostics problems] // Kontrol. Diagnostika. 2008. № 11. P. 6–15.

УДК 629.4.016.2

Дмитрий Яковлевич Носырев, доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
Александр Александрович Свечников, преподаватель кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
Андрей Александрович Котышев, аспирант Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС),
начальник электротехнической лаборатории «Орских коммунальных электрических сетей» —
филиала «Оренбургкоммунэлектросеть»

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА И ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ

Dmitriy Yakovlevich Nosyrev, DSc in Engineering, Professor, Department of Locomoves, Samara State University of Railways (SamGUPS),
Alexander Alexandrovich Svechnikov, Lecturer, Department of Locomoves, Samara State University of Railways (SamGUPS),
Andrey Alexandrovich Kotyshev, graduate student, Samara State University of Railways (SamGUPS),
Head of Electrical Laboratory, Orsk Utility Power Grid — branch of Orenburgkommunelektroset

Influence of electrothermal air and fuel treatment on diesel engine performance

Аннотация

Статья посвящена исследованию влияния электротермической обработки воздушного заряда на входе в воздушный ресивер и топлива на входе в топливные насосы высокого давления на эффективность работы дизеля тепловоза. Расчетное моделирование параметров дизеля в исходном состоянии и с помощью электротермической обработки воздуха и топлива выполнено в программном комплексе Diesel-RK. Расчетно-экспериментальные исследования проведены для дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ. Основное внимание уделено обработке полученных расчетно-экспериментальных данных и построению сравнительных индикаторных диаграмм для номинального режима работы дизеля. Дано объяснение физики процесса интенсификации горения топлива путем электротермической обработки воздуха и топлива.

Ключевые слова: дизель, электротермическая обработка, энергия активации горения, индикаторная диаграмма, удельный расход топлива.

Summary

The article studies the influence of electro-thermal processing of air charge entering the air tank and fuel entering high pressure fuel pumps on the efficiency of the diesel locomotive. Numerical modeling of diesel engine parameters in the initial state and using electrothermal air and fuel treatment is made in the software package Diesel-RK. Analysis and experimental studies were conducted for the diesel engine K6S310DR of CHMEZ locomotive. A special attention has been paid to the processing of obtained calculations and experimental data and construction of comparative indicator diagrams for typical operation of the diesel engine. An explanation of process physics of fuel combustion intensification through electrothermal treatment of air and fuel is provided.

Keywords: diesel engine, electrothermal treatment, activation energy of combustion, indicator diagram, specific fuel consumption.

Одна из важнейших проблем, стоящих перед всеми отраслями экономики России, — оптимальное использование энергоресурсов. Для железнодорожного транспорта, который относится к числу главных потребителей органического топлива при выполнении маневровой и магистральной деятельности, эта задача особенно актуальна, ведь только на тягу поездов в нашей стране расходуется около 3 млн т дизельного топлива в год.

Существуют различные методы повышения эффективности работы дизелей: внесение изменений в конструкцию двигателей, использование альтернативного топлива, совершенствование рабочего процесса. К числу наиболее эффективных относится увеличение полноты сгорания топлива в цилиндре дизеля. Для этого необходимо интенсифицировать внутрицилиндровые процессы (распыл топлива, его испарение и горение), в частности, при помощи электрической обработки воздуха и топлива. Ее преимуществами являются высокая экономичность, обусловленная непосредственным преобразованием электрической энергии в энергию движения частиц и химическую энергию ионов и электронов; конструктивная простота аппаратов; возможность непрерывного тонкого регулирования и управления процессами путем изменения приложенного напряжения. Кроме того, этот способ не требует внесения изменений в конструкцию двигателей [1].

Расчетное моделирование влияния электротермической обработки воздуха и топлива на параметры дизеля выполнено в программном комплексе Diesel-RK. Используемые в программе модели позволяют проводить расчеты с высокой точностью для любых режимов работы дизеля.

Все расчеты выполнены для дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ. Исходные данные: диаметр цилиндра — 310 мм, ход поршня — 360 мм, номинальная частота вращения — 750 об/мин, степень сжатия — 13, степень повышения давления в компрессоре — 1,8.

Для более точного исследования в качестве исходных были взяты параметры дизеля, снятые при реостатных испытаниях тепловоза ЧМЭЗ. Экспериментальные исследования дизеля K6S310DR проведены на пункте реостатных испытаний ТЧ-26 Южно-Уральской железной дороги (табл. 1).

Электротермическая обработка воздуха на входе в воздушный ресивер и топлива на входе в топливные насосы высокого давления приводит к повышению скорости горения топлива и к уменьшению энергии активации горения на 5–20 % [2, 3].

Таким образом, параметры дизеля рассчитаны для исходного состояния и для условий с уменьшенной энергией активации горения топлива на 5–20 % (табл. 2).

По результатам расчетов выполнена сравнительная оценка эффективной мощности, удельного расхода топлива, показателей сгорания топлива и экологических показателей в исходном состоянии и с электротермической обработкой воздуха и топлива.

Из полученных данных можно сделать вывод, что с уменьшением энергии активации сгорания топлива за счет электротермической обработки растет положительный эффект по всем параметрам работы дизеля. Максимальный эффект наблюдается при уменьшении энергии активации сгорания на 20 %.

Чтобы сравнить индикаторные характеристики дизеля в исходном состоянии и с электротермической обработкой топлива, по результатам расчетов построены свернутые диаграммы для номинального режима работы дизеля (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что изменения наблюдаются в верхней части диаграммы. В среднем индикаторный КПД дизеля с электротермической обработкой воздуха и топлива увеличился на 0,5–5 % [4].

Таблица 1

Временной срез при сьеме тепловозной характеристики

| Позиция КМ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{г^*}$, кВт | 0 | 78 | 149 | 212 | 367 | 497 | 632 | 709 | 868 |
| $I_{г^*}$, А | 0 | 780 | 1076 | 1286 | 1371 | 1589 | 1752 | 1832 | 2032 |
| $U_{г^*}$, В | 0 | 100 | 139 | 165 | 268 | 313 | 361 | 387 | 427 |
| $I_{обг^*}$, А | 0 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| $I_{н^*}$, А | 0 | 0,57 | 0,7 | 0,7 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| $I_{ш^*}$, А | 0 | 0,36 | 0,42 | 0,48 | 0,84 | 0,95 | 0,84 | 1,01 | 1,11 |
| $U_{вг^*}$, В | 111,5 | 111,5 | 111,7 | 111,7 | 111,8 | 111,7 | 109,6 | 107,1 | 105,1 |
| $U_{н^*}$, В | 117 | 118 | 116 | 115 | 117 | 118 | 118 | 117 | 117 |
| $N_{диз^*}$, об/мин | 323 | 330 | 357 | 101 | 174 | 555 | 610 | 689 | 759 |
| $N_{тк^*}$, об/мин | 2220 | 3114 | 3873 | 4667 | 6634 | 7799 | 9865 | 12545 | 13655 |

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов расчетно-экспериментального исследования дизеля тепловоза ЧМЭЗ

| Показатели дизеля на номинальном режиме (8-я позиция контроллера машиниста) | Исходное состояние | С электротермической обработкой воздуха и топлива | | | |
|--|---|---|---------|---------|---------|
| | Энергия активации горения топлива, кДж/моль | | | | |
| | 24 | 22,8 | 21,6 | 20,4 | 19,2 |
| Мощность, кВт | 868,94 | 871,9 | 873,96 | 878,36 | 920,48 |
| Удельный расход топлива, кг/(кВт·ч) | 0,26 | 0,25917 | 0,25856 | 0,25726 | 0,24549 |
| Индикаторный КПД | 0,39157 | 0,39272 | 0,39349 | 0,39527 | 0,41151 |
| Максимальное давление цикла, бар | 66,638 | 66,563 | 66,514 | 66,605 | 68,735 |
| Максимальная температура цикла, К | 1425,9 | 1429,8 | 1433,1 | 1438,8 | 1488,1 |
| Угол максимального давления, град. за ВМТ | 7 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| Угол максимальной температуры, град. за ВМТ | 41 | 41 | 41 | 41 | 39 |
| Период задержки воспламенения в цилиндре, град | 4,4897 | 7,1542 | 8,4477 | 9,9912 | 11,882 |
| Продолжительность сгорания, град. п.к.в. | 173,2 | 170,6 | 168,8 | 165,4 | 146,00 |
| Эмиссия дыма по шкале Бош | 2,8549 | 2,8582 | 2,861 | 2,8556 | 2,5589 |
| Эмиссия твердых частиц, г/кВт·ч | 1,1596 | 1,1575 | 1,1561 | 1,1467 | 0,9365 |
| Эмиссия оксидов азота, г/кВт·ч | 3,5897 | 3,5413 | 3,5171 | 3,4795 | 3,8949 |

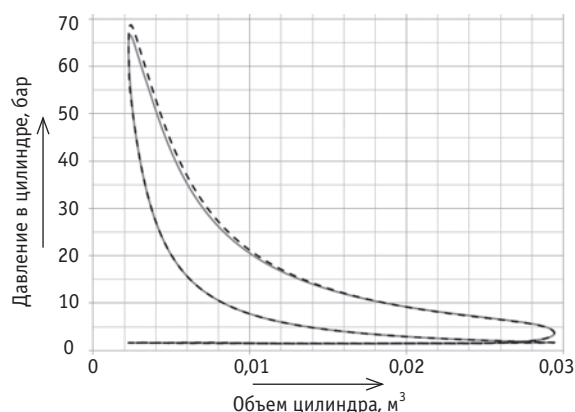


Рис. 1. Сравнительный анализ индикаторных диаграмм дизеля в исходном состоянии и с электротермической обработкой топлива
 — исходное состояние; - - - с электротермической обработкой

В целом расчетно-экспериментальные исследования дизеля тепловоза ЧМЭЗ показали, что при использовании электротермической обработки наблюдается:

- увеличение индикаторного КПД дизеля на 0,5–5 %;
- снижение удельного расхода топлива на 0,5–6 %;
- увеличение эффективной мощности на 0,5–6 %;
- уменьшение дымности и эмиссии твердых частиц;
- небольшой рост эмиссии оксидов азота в отработавших газах.

Чтобы проверить целесообразность применения электротермической обработки воздуха и топлива, оценим годовой экономический эффект от снижения удельного расхода топлива минимум на 1,5 % маневровым тепловозом типа ЧМЭЗ:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E} - E_{\text{н}} \cdot K,$$

где \mathcal{E} — годовая величина экономии средств от снижения расхода топлива в эксплуатации;

$E_{\text{н}} = 0,15$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

K — капиталовложения (в данном случае — сумма сметы затрат на НИР и капиталовложений на внедрение результатов НИР).

Годовая величина экономии средств от снижения расхода топлива в эксплуатации рассчитывается как

$$\mathcal{E} = \Delta b_e \cdot N_e \cdot T_e \cdot C_{\text{т}},$$

где $\Delta b_e = 0,234 - 0,2303 = 0,0037$ — снижение удельного эффективного расхода топлива в эксплуатации, кг/(кВт·ч);

N_e — средняя эффективная мощность дизеля в эксплуатации, кВт (равна 840 кВт);

T_e — средняя наработка в эксплуатации за год, ч (равна 4015 ч);

$C_{\text{т}}$ — стоимость 1 т дизельного топлива, руб. (равна 22 000 руб.).

Затраты по разработке системы для электротермической обработки воздуха и топлива оцениваются в 45 тыс. руб. Для обработки воздуха и топлива необходимо потратить 0,78 кДж/кг. Поскольку затраты на обработку топлива составят $1,83 \cdot 10^{-3} \%$ от его теплотворной способности, ими можно пренебречь. При определении затрат на заработную плату учитывается количество исполнителей, продолжительность работ и месячная зарплата исполнителя. Начисления на заработную плату составляют 26,2 % от фонда заработной платы и равны 28,3 тыс. руб. Капиталовложения на внедрение системы включают в себя затраты на ее сборку, установку и отладку и составляют 45 тыс. руб.

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от использования электротермической обработки воздуха и топлива в эксплуатации составит 263,5 тыс. руб. на один маневровый тепловоз типа ЧМЭЗ.

Литература

- Носырев Д. Я., Свечников А. А. Разработка методов и средств повышения эффективности элементов газозвоздушного тракта тепловозных дизелей // Технические науки: традиции и инновации: матер. II междунар. науч. конф., Челябинск, окт. 2013 г. С. 71–74.
- Ноженко Е. С., Пилатов А. Ю. Прогнозирование уровня энергии активации топлива на основе теории теплового взрыва // Вестник Донецкого института автомобильного транспорта. 2009. № 3. С. 27–34.
- Козменков И. Н., Носырев Д. Я. Повышение эффективности работы дизелей тепловозов с помощью электротермической обработки топлива // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27). Ч. II. С. 150–155.
- Совершенствование метода анализа процесса сгорания по индикаторной диаграмме / А. С. Анисимов, Е. И. Сковородников, О. В. Балагин, Ю. Б. Гришина // Наука и техника транспорта. 2010. № 4. С. 57–63.

References

- Nosyrev D. Ya., Svechnikov A. A. Razrabotka metodov i sredstv povysheniya effektivnosti elementov gazovozdushnogo trakta teplovoznykh dizeley [Development of methods and means to improve efficiency of diesel engine gas path components] // Tekhnicheskie nauki: traditsii i innovatsii: mater. II mezhdunar. nauch. konf., Chelyabinsk, okt. 2013 g. P. 71–74.
- Nozhenko E. S., Pilatov A. Yu. Prognozirovaniye urovnya energii aktivatsii topliva na osnove teorii teplovogo vzryva [Predicting the level of fuel activation energy based on the theory of thermal explosion] // Vestnik Donetskogo instituta avtomobilnogo transporta. 2009. № 3. P. 27–34.
- Kozmenkov I. N., Nosyrev D. Ya. Povysheniye effektivnosti raboty dizeley teplovozov s pomoschyu elektrottermicheskoy obrabotki topliva [Improving the efficiency of diesel locomotives using electrothermal fuel processing] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. S. P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta). 2011. № 3 (27). Ch. II. P. 150–155.
- Sovershenstvovanie metoda analiza protsessa sgoraniya po indikatornoy diagramme [Improvement of the method of analysis of the combustion process on the indicator diagram] / A. S. Anisimov, E. I. Skovorodnikov, O. V. Balagin, Yu. B. Grishina // Nauka i tekhnika transporta. 2010. № 4. P. 57–63.

УДК 621.892.097.2

Елена Роменовна Магарил, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика природопользования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург,
Ромен Зеликович Магарил, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Тюменского государственного нефтегазового университета (ТюмГНГУ)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОТРАНСПОРТА ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИСАДКИ К ТОПЛИВАМ

Elena Romenovna Magaril, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Environmental Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg,
Romen Zelikovich Magaril, DSc in Engineering, Professor, Senior Researcher, Tyumen State Oil and Gas University (TSOGU)

Improving environmental safety and efficient operation of motor vehicles by using fuel additive

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности эксплуатации автомобильного транспорта и снижения его вредного воздействия на окружающую среду за счет улучшения качества применяемых топлив.

Самым быстрореализуемым и малозатратным методом улучшения качества топлив является применение высокоэффективных присадок. На основании сформулированных авторами требований к свойствам присадок и анализа данных по каталитическим и физико-химическим свойствам веществ обоснована формула универсальной присадки для бензинов и дизельных топлив, а также технология ее получения. Присадка всесторонне исследована в лабораторных, стендовых, дорожных и опытно-промышленных испытаниях. Показано, что применение присадки в ультрамалых количествах позволяет значительно улучшить эксплуатационные и экологические свойства моторных топлив и характеристики автотранспорта.

Ключевые слова: многофункциональная присадка, подавление нагарообразования, расход топлива, экологические и эксплуатационные характеристики автомобилей.

Summary

The article examines the issues of improvement of operational efficiency of road transport and reduction of its harmful effects on the environment by improving the quality of fuels used.

The most marketable and low-cost method of improving fuel quality is the use of high-performance additives. On the basis of the requirements to the properties of additives set forth by the authors and analysis of data on catalytic and physico-chemical properties of substances, a formula of universal additive for gasolines and diesel fuels has been substantiated, as well as the technology of its production. The additive has been thoroughly investigated in laboratory, bench, road and pilot trials. It is shown that the use of the additive in ultrasmall quantities can significantly improve the performance and environmental properties of motor fuels and vehicle characteristics.

Keywords: multi-functional additive, suppression of soot formation, fuel consumption, environmental performance of vehicles.

Автотранспорт, будучи одним из основных потребителей моторных топлив, оказывает весьма значительное влияние на мировую экономику и, как следствие, на геополитику. Самые серьезные проблемы, связанные с его негативным воздействием, которые предстоит решить человечеству, — ухудшение состояния окружающей среды и истощение природных ресурсов нефти и газа [1, 2]. К числу факторов, которые влияют на экологическую безопасность и эффективность эксплуатации автотранспорта, относятся система поддержания его работоспособности, характеристики подвижного состава, характеристики топлива, организация движения, дорожная сеть, условия эксплуатации, нормативное обеспечение [3]. Наиболее быстрореализуемым и наименее затратным методом, позволяющим улучшить экологические, экономические и эксплуатационные характеристики автомобилей при существующем автопарке и качестве моторных топлив, является введение в топливо высокоэффективных присадок — как влияющих на отдельные характеристики АТС, так и многофункциональных [4–6].

Следует отметить, что методы нефтепереработки не могут обеспечить необходимый уровень таких свойств топлив, как моющие и смазывающие, — этот уровень достигается исключительно за счет применения соответствующих присадок. Сегодня ассортимент реализуемых на мировом рынке присадок к топливам насчитывает около 2500 торговых марок, причем только в США ежегодное потребление присадок превышает 100 тыс. т. Для России улучшение качества моторных топлив, в значительной степени определяющего характеристики автомобилей, является особо важной задачей, учитывая быстрое расширение автопарка при неизменном и даже ухудшающемся качестве топлива [7, 8].

На основе проведенных теоретических исследований [4], данных о каталитических и физико-химических свойствах веществ авторами были сформулированы требования к свойствам присадки, которые могут улучшить экологические и эксплуатационные характеристики автотранспортных средств.

1. Требование подавления нагарообразования в двигателях. Максимальная температура, которая достигается при сгорании топливовоздушной смеси в двигателе, зависит при прочих равных условиях от теплоотдачи к стенкам цилиндра, а последняя в большой степени определяется их температурой [4–6]. Благодаря высокой теплопроводности металла температура стенок не сильно отличается от температуры охлаждающей воды. Однако образующийся в процессе эксплуатации нагар значительно снижает теплоотвод через стенки, так как его коэффициент теплопроводности в $1\text{--}2 \cdot 10^3$ раз, а теплоемкость примерно в 3 раза меньше, чем у металла.

Слой нагара из-за своих теплоизоляционных свойств даже при малой толщине вызывает повышение температуры стенок двигателя. Проведенные нами расчеты показывают, что после отложения нагара в зависимости от толщины слоя, доли углерода в аморфном состоянии, а также от температуры охлаждающей жидкости температура стенки поднимается на 200° и выше. Это на 5–10 % и более снижает отвод тепла из объема камеры сгорания к стенке и приводит к повышению максимальной температуры в камере сгорания [9].

По мере накопления нагара в камере сгорания и достижения некоторого равновесия по его толщине для обеспечения бездетонационной работы бензинового двигателя, как известно из практики эксплуатации автомобилей, требуемое октановое число бензина повышается до 10 пунктов. Кроме того, нагар, являясь реакционно-активным, склонен к самовоспламенению при $330\text{--}360^\circ$. Раскаляясь при сжигании топливной смеси и выпуске продуктов сгорания, нагар из-за низкой теплопроводности сохраняет высокую температуру и склонность к взаимодействию с кислородом при впуске топлива, образуя «горячие точки», которые вызывают поджигание заряда до подачи искры. Возникает калильное зажигание. Преждевременное горение в такте сжатия, в свою очередь, приводит к значительному повышению расхода энергии на сжатие, росту удельного расхода топлива, снижению мощности двигателя. Скорость нагрева рабочей смеси в такте сжатия в результате калильного зажигания возрастает, что в бензиновых двигателях дополнительно увеличивает возможность возникновения детонации.

Кроме того, отложение нагара на рабочих поверхностях в двигателе значительно увеличивает трение, что приводит к повышению удельного расхода топлива и снижению мощности двигателя.

Устранение нагарообразования должно, таким образом, благодаря смягчению температурного режима в двигателе привести к снижению требований к октановому числу бензина до 10 пунктов, увеличению мощности бензиновых и дизельных двигателей, сокращению удельного расхода топлива.

Кроме того, устранению нагара в бензиновых двигателях сопутствует практически полное устранение выбросов полициклических ароматических углеводородов, в том числе сильнейшего канцерогена — бенз(α)пирена. Необходимо также

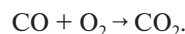
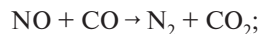
отметить, что снижение удельного расхода топлива приведет к сокращению выбросов парниковых газов (CO_2 , CH_4 и др.).

Рассчитанные авторами зависимости констант равновесия реакций, определяющих образование оксидов азота и углерода (NO и CO) в двигателе, от температуры [4] показывают, что понижение максимальной температуры в камере сгорания в результате улучшения теплоотвода через стенку при устранении нагарообразования позволит значительно сократить выбросы оксидов азота и углерода.

Количество нагара, накапливающегося на стенках камеры сгорания, определяется соотношением скоростей реакций конденсации непредельных и ароматических углеводородов в пристенной пленке и окисления и газификации продуктов конденсации кислородом, диоксидом углерода и водой. Следовательно, присадка должна быть эффективным катализатором реакций окисления и газификации.

2. Требование снижения выбросов продуктов неполного горения. Присадка должна снижать количество продуктов неполного горения в отработавших газах — углеводородов и их оксипроизводных. Поскольку эти продукты образуются в основном в области невысоких температур в пристенной пограничной пленке, присадка должна обеспечить катализ их полного окисления и газификации (при недостатке кислорода).

3. Требование снижения выбросов оксида азота и углерода. Присадка должна обеспечить разложение и (или) восстановление оксида азота и окисление оксида углерода. Таким образом, она должна быть катализатором реакций:



4. Требование снижения выбросов сажи. Присадка должна подавлять образование сажи, что принципиально возможно за счет облегчения образования зародышей сажи — и соответственно увеличения ее дисперсности. Скорость горения сажи во фронте пламени пропорциональна площади поверхности сажевых частиц; увеличение дисперсности сажи повышает степень ее сгорания.

Альтернативой увеличению степени сгорания сажи во фронте пламени является катализ горения углерода.

5. Требование повышения моющих свойств топлив. Для обеспечения чистоты топливной системы автомобилей и бесперебойной работы двигателей с впрыском бензина обязательны высокие моющие свойства топлив, что достигается только применением присадок и не решается методами нефтепереработки. Присадка должна эффективно улучшать моющие свойства топлива, что возможно при ее высокой поверхностной активности, обеспечивающей солюбилизацию смолистых веществ или создание на поверхности металла прочных адсорбционных слоев, препятствующих осаждению смолистых веществ.

6. Требование повышения цетанового числа дизельных топлив. Величина цетанового числа дизельных топлив влияет на ряд эксплуатационных показателей дизельных двигателей,

таких как время запуска холодного двигателя, удельный расход топлива, КПД двигателя. Присадка должна повышать цетановое число дизельного топлива, т.е. быть катализатором самовоспламенения.

7. Требование улучшения смесеобразования в двигателе. Проведенные авторами исследования [4, 6] показали, что распыление бензина данного качества может быть улучшено при введении в него поверхностно-активных веществ, которые снижают поверхностное натяжение бензина на границе с воздухом. Таким образом, присадка должна обладать высокой поверхностной активностью.

8. Требование улучшения низкотемпературных свойств дизельных топлив. Присадка должна снижать предельную температуру фильтруемости дизельного топлива, характеризующую возможность его использования в эксплуатационных условиях при низких температурах, что важно для России.

9. Требование повышения противоизносных свойств дизельных топлив. В дизельных двигателях топливные насосы высокого давления подвергаются износу плунжерных пар. По мере снижения в дизельных топливах содержания серы их противоизносные свойства резко ухудшаются и могут быть улучшены только путем введения присадок, представляющих собой поверхностно-активные вещества. Следовательно, присадка должна улучшать смазывающие свойства дизельного топлива, что обеспечивается за счет поверхностно-активного действия.

10. Требование растворимости в топливе. Присадка должна быть в виде истинного раствора в топливе во всех условиях его применения, в том числе при низких температурах. В противном случае это отрицательно скажется на характеристиках двигателя.

11. Требование отсутствия дополнительных загрязнителей. Присадка не должна быть источником новых токсичных веществ, не образующихся при использовании топлива без присадки.

12. Требование доступности и низкой стоимости сырья. Присадка должна синтезироваться из доступного сырья и не влиять существенно на стоимость топлива.

На основании сформулированных требований и проведенного скрининга данных по каталитическим свойствам веществ авторами была разработана формула олеорастворимой многофункциональной присадки и технология ее получения, а также установлены оптимальные концентрации в топливе, составляющие 9,25 ppm для бензинов и 27,75 ppm для дизельных топлив.

Присадка была всесторонне изучена в лабораторных, стендовых, дорожных и опытно-промышленных испытаниях, результаты приведены ниже.

Исследования по влиянию многофункциональной присадки на нагарообразование в двигателях показали, что при ее концентрации в бензинах 9,25 ppm и в дизельных топливах 27,75 ppm нагар устраняется практически полностью [10]. Кроме того, установлено положительное влияние присадки на смесеобразование в двигателях, что снижает вероятность попадания капли на стенку и, как следствие, образование нагара.

Испытания влияния присадки на расход топлива дизельным локомотивом 2ТЭ116 № 42 показали, что после 9 ч работы снижение расхода топлива составило 6,9%. При вскрытии

камеры сгорания одного из цилиндров до и после пробега зафиксировано резкое уменьшение количества нагара на клапанах и на головке поршня (рис. 1).

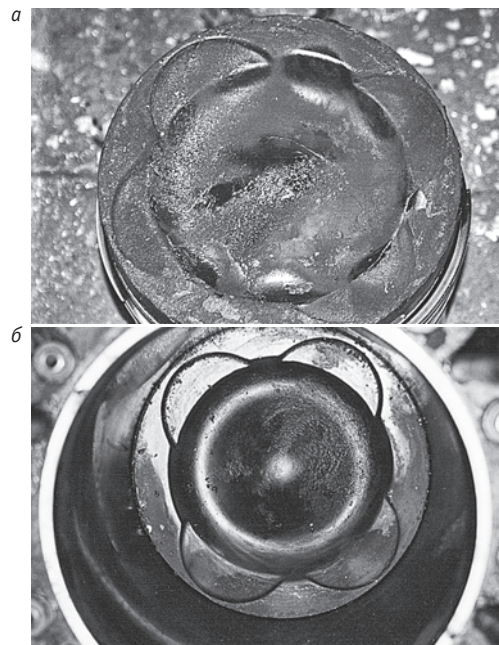


Рис. 1. Состояние головки поршня дизельного локомотива 2ТЭ116 № 42:

а — до применения присадки;
б — спустя 9 ч работы на топливе с присадкой

В ходе испытаний на стендовом дизельном двигателе при его максимальной нагрузке установлено, что присадка в концентрации 27,75 ppm снижает содержание сажи на 50%. Выбросы CO, CH и NO₂ сокращаются соответственно на 14,6, 37,2 и 20,6%. Влияние присадки на дымность отработавших газов характеризуется данными, представленными на рис. 2.

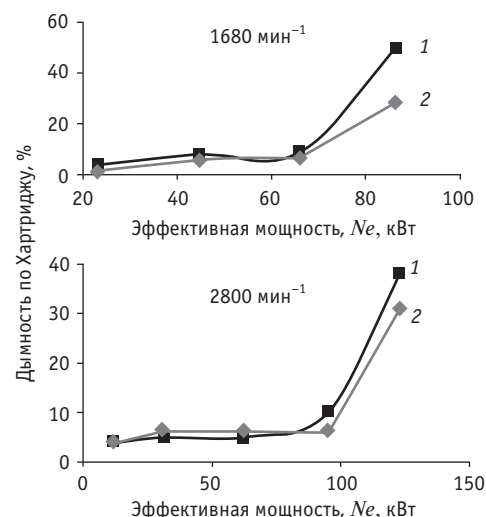


Рис. 2. Влияние присадки на выбросы сажи:
1 — без присадки; 2 — с присадкой

Как показали исследования, введение присадки значительно увеличивает цетановое число (рис. 3), улучшает смазывающие и низкотемпературные свойства дизельного топлива.

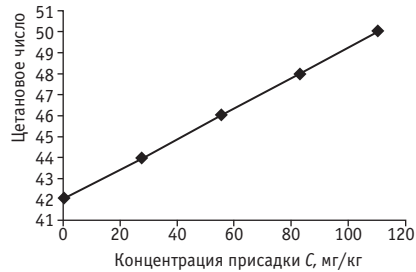


Рис. 3. Зависимость цетанового числа от концентрации присадки

Результаты испытаний по влиянию многофункциональной присадки на удельный расход бензина (пробег каждого автомобиля до начала испытаний составлял около 20 000 км) приведены на рис. 4. Требования автомобилей с бензиновыми двигателями к октановому числу бензина после применения присадки снизились на 6–10 пунктов [11].

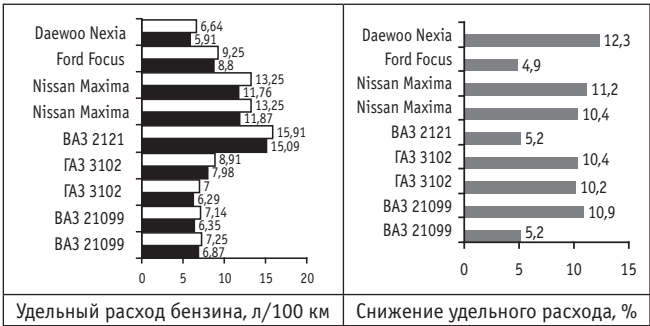


Рис. 4. Влияние присадки (9,25 ppm) на удельный расход бензина:
□ — без присадки; ■ — с присадкой

При техническом осмотре двигателей в конце испытаний установлено значительное очищение свечей зажигания, клапанов и цилиндропоршневой группы от нагара. На рис. 5 приведены фотографии двигателей Nexia SOHC автомобилей UZ-Daewoo после применения присадки.

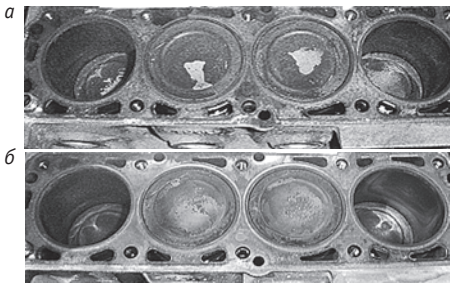


Рис. 5. Состояние цилиндропоршневой группы автомобилей UZ-Daewoo с двигателями Nexia SOHC после пробега 1935 км:
а — контрольный автомобиль; б — испытываемый автомобиль, пробег после применения присадки

Исследования по влиянию присадки на выбросы бенз(α)-пирена автомобилями с бензиновыми двигателями на холостом ходу [12] показали, что снижение выброса полициклических ароматических углеводородов составляет ~95 % (табл. 1), это увеличивает срок службы каталитических нейтрализаторов, а также, несомненно, представляет огромный экологический интерес.

Таблица 1

Влияние присадки на выбросы бенз(α)пирена и других полициклических ароматических углеводородов (автомобиль ГАЗ-3102, холостой ход)

| Бензин | Содержание в отработавших газах, мг/м ³ | |
|--------------|--|---|
| | Бенз(α)пирен | Сумма полициклических ароматических углеводородов легче бенз(α)пирена |
| Без присадки | 0,00023 | 0,00583 |
| С присадкой | 0,00001 | 0,00030 |
| Изменение, % | –95,7 | –94,9 |

На стендовых испытаниях автомобилей с бензиновыми двигателями установлено, что введение присадки снижает выбросы оксида углерода на 15–30 %, оксидов азота — до 26 %, углеводородов — на 8–35 %.

В результате моющего действия присадки происходит очистка топливной системы от смолистых отложений. Испытания показали, что разработанная присадка обладает исключительно высокими моющими свойствами и гораздо эффективнее лучших аналогов (Paradine-50, MPA-85), представленных на мировом рынке. Так, за счет ее применения моющие свойства топлива повышаются в 2,3 раза при расходе почти в 20 раз меньше, чем у обычно применяемых присадок [13].

Являясь поверхностно-активным веществом, присадка концентрируется на поверхности бензина, что снижает давление его насыщенных паров и, как следствие, потери от испарения (рис. 6).

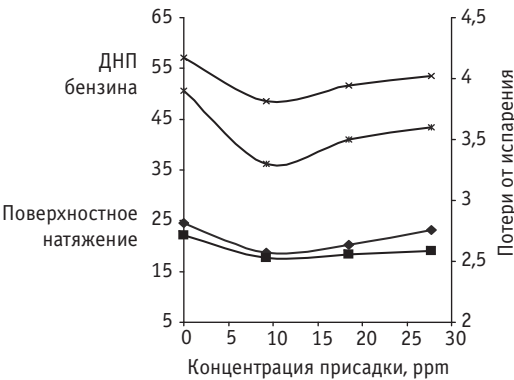


Рис. 6. Влияние присадки на величину поверхностного натяжения бензина при температуре 15°С, на ДНП бензина и потери бензина от испарения:

—×— ДНП бензина, кПа; —*— потери бензина от испарения, % масс;
—◆— поверхностное натяжение, мН/м (А 80);
—■— поверхностное натяжение, мН/м (АИ 92)

Влияние присадки на давление насыщенных паров и поверхностное натяжение дает ценный технический результат — снижаются потери бензина от испарения и одновременно улучшается смесеобразование [14].

Исследование состава отработавших газов атомно-адсорбционным методом показало отсутствие в них дополнительных токсичных компонентов, не наблюдавшихся до применения присадки.

Следует отметить, что присадку можно вводить не только в процессе производства топлива, но и в готовое топливо на АЗС, а также непосредственно в топливные баки автотранспортных средств.

Сравнение известных и широко применяемых монофункциональных присадок с предлагаемой показывает, что первые являются значительно менее эффективными, более дорогими и имеют в 20–100 раз больший расход [15]. Эффективность разработанной многофункциональной присадки и ее аналогов на мировом рынке приведена в табл. 2.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование разработанной многофункциональной присадки позволит не только быстро улучшить экологическую обстановку в больших городах и решить актуальную для ряда стран проблему дефицита высокооктановых бензинов, но и существенно сэкономить потребляемое топливо без капитальных вложений в автомобилестроение и нефтепереработку.

Таблица 2

Влияние разработанной многофункциональной присадки на эксплуатационные, экологические и экономические характеристики автомобилей и свойства моторных топлив (концентрация присадки 9,25 ppm в бензине и 27,75 ppm в дизельном топливе)

| Показатель | Бензиновые двигатели, бензин | Дизельные двигатели, дизтопливо | Аналоги |
|--|--|--------------------------------------|---|
| Снижение расхода топлива | 5–12 % | 4–7 % | По патентным данным, при расходе 0,1–0,5 % менее эффективны |
| Снижение нагара | ~ 95–100 % | ~ 95–100 % | При расходе 0,05–0,10 % менее эффективны |
| Сокращение времени смыва отложений | 2,33 раза | 2,33 раза | Такая же эффективность при расходе 0,025–0,05 % |
| Снижение выбросов: CO NO _x CH бенз(α)пирен и его аналоги сажа | 15–30 % 0–26 % 8–35 % 95 % — | 15 % 20–22 % 35 % — 40 % | Известные присадки дают такой же эффект при концентрации в 50–100 раз большей. Аналоги по влиянию на выбросы бенз(α)пирена неизвестны |
| Снижение требований к октановому числу бензина | 4–10 пунктов | — | Известны присадки такой же эффективности при расходе в 50–100 раз большем |
| Цетановое число | — | + 3 пункта | Известные цетаноповышающие добавки дают такой же эффект при расходе в 18–36 раз большем |
| Смазывающая способность (коэффициент трения покоя) | — | –25 % | Расход присадок такого же уровня эффективности составляет 0,05–0,10 % |
| Снижение потерь бензина от испарения | 15–20 % | — | Аналоги отсутствуют |

Литература

1. Абржина Л. Л., Магарил Е. Р. Оценка эколого-экономической эффективности применения многофункциональных присадок к моторным топливам : монография. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2010. 151 с.
2. Голубева А. С., Магарил Е. Р. Совершенствование механизма экономического стимулирования сокращения выбросов CO₂ автомобилями // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 39–45. ISSN 1815-9400.
3. Магарил Е. Р., Абржина Л. Л., Голубева А. С. Эколого-экономические проблемы и перспективы использования топливно-энергетических ресурсов // Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление. 2013. № 5. С. 114–130.
4. Магарил Е. Р. Влияние качества моторных топлив на эксплуатационные и экологические характеристики автомобилей : монография. М. : КДУ, 2008. 164 с.
5. Магарил Е., Магарил Р. Автомобильные топлива: проблемы энергоэффективности и экологической безопасности : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, 2012. 206 с.
6. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Моторные топлива : учеб. пособие / 2-е изд. М. : КДУ, 2010. 160 с.
7. Магарил Е. Р. Модернизация нефтепереработки как фактор устойчивого развития автотранспорта // Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление. 2011. № 4. С. 32–37.
8. Магарил Е. Р., Магарил Р. З. Возможности обеспечения экологической безопасности автотранспорта модернизацией нефтепереработки // Известия вузов. Нефть и газ. 2012. № 2. С. 116–122.
9. Влияние нагарообразования на экологическую безопасность эксплуатации автомобилей с бензиновыми двигателями / Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, А. В. Чендарев, Н. В. Корзун // Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 3. С. 85–89.
10. Magaril E. The influence of carbonization elimination on the environmental safety and efficiency of vehicle operation // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2013. 8 (2). P. 231–245.
11. Пат. 2505589 Российская Федерация. Способ снижения требования автомобильных бензиновых двигателей к величине октанового числа / Магарил Е. Р., Магарил Р. З. № 2010112334/04; заявл. 30.03.10; опубл. 27.01.14, Бюл. № 3.
12. Пат. 2468069 Российская Федерация. Способ подавления выброса бенз(α)пирена и его аналогов автомобилями с бензиновыми двигателями / Магарил Е. Р., Магарил Р. З. № 2011134171/04; заявл. 12.08.11; опубл. 27.11.12, Бюл. № 33.
13. Пат. 2237080 Российская Федерация. Моющая присадка к моторным топливам / Магарил Р. З., Магарил Е. Р. № 2003101756/04; заявл. 21.01.03; опубл. 27.09.04, Бюл. № 27.
14. Пат. 2256693 Российская Федерация. Способ снижения потерь легких углеводородов от испарения при их хранении и использовании / Магарил Р. З., Магарил Е. Р., Шаламберидзе О. В. № 2004111057/04; заявл. 12.04.04; опубл. 20.07.05, Бюл. № 20.
15. Magaril E. Improving car environmental and operational characteristics using a multifunctional fuel additive // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2011. Vol. 147. P. 373–384.

References

1. Abrzhina L. L., Magaril E. R. Otsenka ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya mnogofunktsionalnykh prisadok k motornym toplivam : monografiya [Assessment of environmental and economic efficiency of multifunctional additives for motor fuels : a monograph]. Ekaterinburg : UGTU-UPI, 2010. 151 p.
2. Golubeva A. S., Magaril E. R. Sovershenstvovanie mekhanizma ekonomicheskogo stimulirovaniya sokrascheniya vybrosov CO₂ avtomobilyami [Improving economic incentives to reduce CO₂ emissions from cars] // Transport of the Urals. 2013. № 3 (38). P. 39–45. ISSN 1815-9400.
3. Magaril E. R., Abrzhina L. L., Golubeva A. S. Ekologo-ekonomicheskie problemy i perspektivy ispolzovaniya toplivno-energeticheskikh resursov [Ecological and economic problems and prospects for the use of energy resources] // Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravlenie. 2013. № 5. P. 114–130.
4. Magaril E. R. Vliyaniye kachestva motornykh topliv na ekspluatatsionnye i ekologicheskie kharakteristiki avtomobiley : monografiya [Influence of the quality of motor fuels on the performance and environmental properties of vehicles : a monograph]. M. : KDU, 2008. 164 p.
5. Magaril E., Magaril R. Avtomobilnye topliva: problemy energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti : monografiya [Car fuels: issues of energy efficiency and environmental safety : a monograph]. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, 2012. 206 p.
6. Magaril E. R., Magaril R. Z. Motornye topliva : ucheb. posobie [Motor fuels : a textbook] / 2-e izd. M. : KDU, 2010. 160 p.
7. Magaril E. R. Modernizatsiya neftepererabotki kak faktor ustoychivogo razvitiya avtotransporta [Modernization of refinery as a factor of sustainable development of transport] // Vestnik UrFU. Ser. Ekonomika i upravlenie. 2011. № 4. P. 32–37.
8. Magaril E. R., Magaril R. Z. Vozmozhnosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti avtotransporta modernizatsiey neftepererabotki [Opportunities of promoting environmental security of vehicles through refinery modernization] // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2012. № 2. P. 116–122.
9. Vliyaniye nagaroobrazovaniya na ekologicheskuyu bezopasnost ekspluatatsii avtomobiley s benzinovymi dvigatelyami [Effect of carbon deposition on the environmental safety of operation of vehicles with petrol engines] / E. R. Magaril, R. Z. Magaril, A. V. Chendarev, N. V. Korzun // Izvestiya vuzov. Neft i gaz. 2011. № 3. P. 85–89.
10. Magaril E. The influence of carbonization elimination on the environmental safety and efficiency of vehicle operation // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2013. 8 (2). P. 231–245.
11. Pat. 2505589 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob snizheniya trebovaniya avtomobilnykh benzinovykh dvigateley k velichine oktanovogo chisla [A method for reducing the requirements of automotive gasoline engines to octane rating] / Magaril E. R., Magaril R. Z. № 2010112334/04; заявл. 30.03.10; опубл. 27.01.14, Byul. № 3.
12. Pat. 2468069 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob podavleniya vybrosov benz(α)-pirena i ego analogov avtomobilyami s benzinovymi dvigatelyami [A method for inhibiting the release of benz(α)pyrene and its analogues in cars with petrol engines] / Magaril E. R., Magaril R. Z. № 2011134171/04; заявл. 12.08.11; опубл. 27.11.12, Byul. № 33.
13. Pat. 2237080 Rossiyskaya Federatsiya. Moyuschaya prisadka k motornym toplivam [Detergents for motor fuels] / Magaril R. Z., Magaril E. R. № 2003101756/04; заявл. 21.01.03; опубл. 27.09.04, Byul. № 27.
14. Pat. 2256693 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob snizheniya poter legkikh uglevodorodov ot ispareniya pri ikh khranении i ispolzovanii [A method of reducing loss of light hydrocarbons from evaporation during storage and use] / Magaril R. Z., Magaril E. R., Shalamberidze O. V. № 2004111057/04; заявл. 12.04.04; опубл. 20.07.05, Byul. № 20.
15. Magaril E. Improving car environmental and operational characteristics using a multifunctional fuel additive // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2011. Vol. 147. P. 373–384.

УДК 654.1/5 (470.53–25)

Михаил Ростиславович Якимов, доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика и управление на предприятии» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), директор Института транспорта ПНИПУ

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В ГОРОДАХ И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ

Mikhail Rostislavovich Yakimov, DSc in Engineering, Professor, Department of Economics and Company Management, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Director of PNRPU Institute of Transport

Urban road traffic organization quality and evaluation methods

Аннотация

Транспортное движение в свободной сети позволяет определить потребность жителей в перемещениях, но не оценивает при этом возможности существующей улично-дорожной сети (УДС). Транспортное движение в нагруженной сети дает возможность определить его существующий объем с учетом транспортных задержек и пропускной способности участков УДС. Сопоставление объемов транспортного движения для свободной и нагруженной сети позволит дать оценку показателя качества организации дорожного движения. Необходимо сравнить потребности жителей, представленные в виде транспортного движения в свободной сети, с тем предложением, которое сформировано в настоящий момент, т.е. с транспортным движением в нагруженной сети. В статье рассмотрен алгоритм получения параметров движения для индивидуального и общественного транспорта в нагруженной сети.

Ключевые слова: транспорт, транспортное планирование, организация дорожного движения, показатели качества, методы оценки показателей качества.

Summary

Traffic in free network allows to determine the need for residents to move around, but not to evaluate to the capacity of the existing road network (RN). Traffic in loaded network enables us to determine its actual level, taking into account transport delays and capacity of RN sections. Comparing the volumes of traffic for free and loaded network allows to assess the quality of traffic management. It is necessary to compare the needs of residents, represented as traffic in the free network, with the proposal formed at the moment, i.e., traffic in a loaded network. The article describes an algorithm for obtaining motion parameters for individual and public transport in loaded network.

Keywords: transport, transport planning, traffic management, quality indicators, methods of evaluation of quality indicators.

Одна из важнейших составляющих качества жизни в современном мегаполисе — возможность удовлетворить транспортные потребности жителей. Эффективность использования ресурсов с целью удовлетворения спроса на транспортную подвижность в первую очередь связана с эффективностью использования городского пространства и обеспечения пропускных и провозных возможностей действующей улично-дорожной сети (УДС). Показателем качества функционирования транспортной системы города является время, а ресурсами для удовлетворения транспортного спроса, в свою очередь, выступают энергия и территория города.

Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории основывается на сопоставлении моделей функционирования различных типов сетей с неизменным транспортным спросом.

Моделирование транспортного движения по территории города проводится последовательно для трех видов состояний транспортной сети:

идеальная сеть — «воздушные» линии, соединяющие центры транспортных районов;

свободная сеть — реальная действующая УДС, каждый элемент которой обладает бесконечной пропускной и провозной способностью. При таких допущениях определяющей характеристикой транспортного предложения является только геометрия моделируемой сети;

нагруженная сеть — реальная действующая УДС, каждый элемент которой обладает конечной пропускной способностью и определяется эксплуатационными показателями, выведенными в [1, 2].

Транспортное движение в свободной сети позволяет установить потребности жителей в перемещениях, но не оценивает при этом возможности существующей УДС. Транспортное движение, полученное в нагруженной сети, дает возможность оценить существующий объем транспортного движения с учетом транспортных задержек и пропускных способностей участков действующей УДС. Сравнение объемов транспортного движения для свободной и нагруженной сети позволит дать оценку показателя качества организации дорожного движения. Необходимо сопоставить потребности жителей, представленные в виде

транспортного движения в свободной сети, с тем предложением, которое сформировано в настоящий момент, т.е. с транспортным движением в нагруженной сети. Расчет параметров движения для индивидуального $J_{ИТ_{kS}}$ и общественного транспорта $J_{ОТ_{kS}}$ в свободной сети для каждой области исследования был приведен в [1]. При этом транспортное движение для индивидуального транспорта $J_{ИТ_{kS}}$ измеряется в авт.-км, а для общественного $J_{ОТ_{kS}}$ — в чел.-км. Рассмотрим более подробно алгоритм получения параметров движения для индивидуального и общественного транспорта в нагруженной сети.

Для нагруженной сети распределение транспортного движения проводится аналогично свободной сети. Отличие заключается в том, что при построении распределения транспортного спроса в нагруженной сети учитывается сопротивление всех ее элементов. При этом рассчитываются задержки транспортного потока на перекрестках и перегонах в соответствии с функциями сопротивления каждого элемента сети. Алгоритм расчета перераспределения потоков с учетом сопротивления элементов сети подробно изложен в [1]. Таким образом, нагрузки на УДС рассчитываются с учетом реализации транспортных корреспонденций за минимально возможное время.

Тогда параметры движения для индивидуального транспорта $J_{ИТ_{kN}}$ будут определяться по соотношению

$$J_{ИТ_{kN}} = \sum_i l_{ik} \cdot q_{ИТ_{Ni}},$$

где $J_{ИТ_{kN}}$ — объем транспортного движения для индивидуального транспорта в k -й ячейке нагруженной сети, авт.-км;

$q_{ИТ_{Ni}}$ — интенсивности движения индивидуального транспорта, полученные в результате распределения корреспонденций на сети с учетом сопротивлений в узлах и перегонах (наблюдаемые интенсивности движения), авт/сут;

l_{ik} — длина i -го участка сети в k -й ячейке (рис. 1), км.

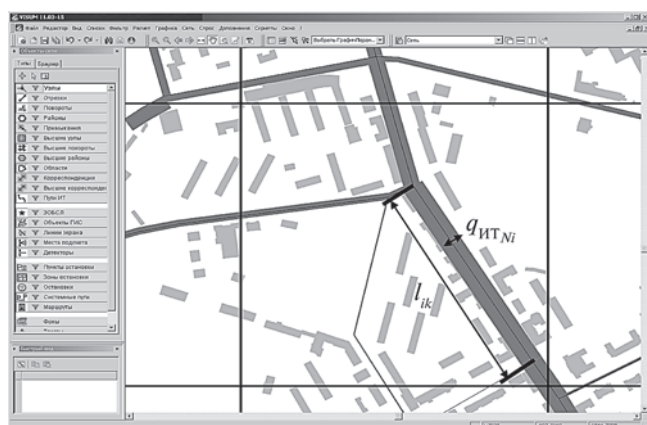


Рис. 1. Параметры расчета объема транспортного движения для индивидуального транспорта в k -й ячейке нагруженной сети

Для общественного транспорта нецелесообразно разделять понятия свободной и нагруженной сети, так как его движение осуществляется по единой маршрутной транспортной сети в соответствии с расписанием. В связи с этим параметры транспортного движения общественного транспорта для сво-

бодной и нагруженной сети совпадают, и дополнительная оценка данного параметра для общественного транспорта не производится. Организация движения общественного транспорта является принципиально иной задачей, отличной от организации движения индивидуального транспорта. Она сводится к формированию эффективной маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования и оптимального с точки зрения транспортных потребностей расписания движения подвижного состава.

Качество организации дорожного движения будем оценивать с помощью такого показателя, как коэффициент корреляции данных, полученных различными способами, с учетом каждой исследуемой области для свободной и нагруженной сети.

Коэффициент корреляции для транспортного движения рассчитывается из соотношения

$$k_{ИТ} = \frac{\sum_k (J_{ИТ_{kN}} - \overline{J_{ИТ_N}})(J_{ИТ_{kS}} - \overline{J_{ИТ_S}})}{\sqrt{\sum_k (J_{ИТ_{kN}} - \overline{J_{ИТ_N}})^2 \sum_k (J_{ИТ_{kS}} - \overline{J_{ИТ_S}})^2}}, \quad (1)$$

где $k_{ИТ}$ — коэффициент корреляции транспортного движения для индивидуального транспорта;

$$\overline{J_{ИТ_N}} = \frac{\sum J_{ИТ_{kN}}}{N} \text{ — среднее значение транспортного дви-}$$

жения в отдельной области для нагруженной сети, авт.-км;

$$\overline{J_{ИТ_S}} = \frac{\sum J_{ИТ_{kS}}}{N} \text{ — среднее значение транспортного движе-}$$

ния в отдельной области для свободной сети, чел.-км;

N — количество областей исследования.

$k_{ИТ}$ будет обобщенной оценкой организации дорожного движения индивидуального транспорта на всей территории города.

Организация дорожного движения ориентирована на удовлетворение транспортного спроса, объем которого различен в разное время суток. Соответственно и качество организации дорожного движения нужно оценивать для каждого периода времени. Например, режим работы светофорных объектов должен быть отстроен в зависимости от суточных интервалов неравномерности и интенсивности транспортных потоков, чтобы максимально эффективно удовлетворить транспортный спрос как в утренние, так и в вечерние часы пик. Если в какой-то из временных интервалов возникают проблемы с удовлетворением транспортных потребностей, то необходимо принимать управленческие решения по изменению организации дорожного движения.

Для оценки качества организации дорожного движения в различные временные интервалы целесообразно обратиться к формуле расчета коэффициента корреляции для суточного значения, но вместо суточных показателей использовать показатели объемов транспортного движения за конкретный временной интервал. То есть в формуле (1) показатели $\overline{J_{ИТ_N}}$ и $\overline{J_{ИТ_S}}$ будут представлять собой средние значения транспортного движения в отдельной области для нагруженной (авт.-км) и свободной сети (чел.-км) в выбранный промежуток времени.

Обобщенная оценка качества организации дорожного движения должна соответствовать системе неравенств:

$$k_{\text{ИТ}}(8:00-10:00) < k_{\text{ИТ}}(10:00-17:00) < k_{\text{ИТ}};$$

$$k_{\text{ИТ}}(17:00-19:00) < k_{\text{ИТ}}(10:00-17:00) < k_{\text{ИТ}},$$

где $k_{\text{ИТ}}$ — обобщенный коэффициент корреляции транспортного движения для индивидуального транспорта;

$k_{\text{ИТ}}(8:00-10:00)$, $k_{\text{ИТ}}(10:00-17:00)$, $k_{\text{ИТ}}(17:00-19:00)$ — коэффициенты корреляции транспортного движения для индивидуального транспорта для временных интервалов 8:00–10:00, 10:00–17:00 и 17:00–19:00 соответственно.

Например, для Перми $k_{\text{ИТ}} = 0,971461$. Полученная оценка корреляционной зависимости говорит о хорошей связи объемов транспортного движения на исследуемой территории в свободной и нагруженной сетях. Это, в свою очередь, свидетельствует о высоком качестве организации дорожного движения на действующей УДС города.

Для оценки качества организации дорожного движения на отдельных локальных участках сети необходимо построить картограмму разности интенсивностей движения индивидуального транспорта для свободной и нагруженной сети. Результат распределения транспортного движения в нагруженной сети приведен на рис. 2, где показаны участки УДС, которые в свободной сети являются перегруженными.

По картограмме (см. рис. 2) можно проследить, как перераспределяется нагрузка с наиболее нагруженных участков УДС на участки — дублиры основных направлений.

Картограмма дает представление о качестве организации дорожного движения на действующей УДС города, хотя по ней нельзя судить об основных преимуществах и недостатках УДС. Географически невозможно как-либо классифицировать элементы действующей сети с точки зрения изменения нагрузки на них при переходе от свободной к нагруженной сети. Смысл данной картограммы заключается в рассмотрении каждого отдельного (а не группы) элемента УДС для определения его возможных резервов в процессе перераспределения транспортных потоков по всей городской УДС.



Рис. 2. Картограмма разности загрузки свободной и нагруженной сети города транспортным движением, авт/сут

Дальнейшая оценка эффективности реализации транспортного спроса на городской территории сводится к различным формам сопоставления полученных модельных перераспределений транспортных потоков для трех видов состояния сети. Попарное сравнение параметров использования городских территорий для удовлетворения транспортных потребностей населения позволяет оценить или качество решения планировочных задач, или качество решения вопросов организации дорожного движения на действующей сети.

Предложенные в данной статье алгоритмы оценки функционирования транспортной системы города находятся в плоскости, описываемой такими координатами, как транспортный спрос и транспортное предложение. Изучение действующих транспортных систем в этой системе отсчета является первоначальным этапом исследования и предшествует этапам моделирования распределения транспортных потоков и их движения на отдельных участках. Предложенный подход позволяет на макроскопическом уровне численно оценить качество транспортной системы города и определить потенциал ее развития на перспективу.

Литература

1. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории // Транспорт Урала. 2010. № 3. С. 34–39. ISSN 1815-9400.
2. Якимов М. Р. Методика оценки транспортного потенциала городской территории // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : матер. междунар. конф. СПб. : СПбГАСУ, 2010. С. 333–337.

References

1. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Metodika otsenki effektivnosti realizatsii transportnogo sprosa na urbanizirovannoy territorii [Methods of assessing the effectiveness of transport demand in urbanized areas] // Transport of the Urals. 2010. № 3. P. 34–39. ISSN 1815-9400.
2. Yakimov M. R. Metodika otsenki transportnogo potentsiala gorodskoy territorii [Methods of assessing transportation potential of urban area] // Organizatsiya i bezopasnost dorozhnogo dvizheniya v krupnykh gorodakh : mater. mezhdunar. konf. SPb. : SPbGASU, 2010. P. 333–337.

УДК 621.311.6:621.316.722

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Владислав Федорович Григорьев, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Анна Викторовна Бондаренко, старший преподаватель кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ АГРЕГАТЕ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Vladislav Fedorovich Grigoryev, PhD in Engineering, Professor, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Anna Viktorovna Bondarenko, Senior Lecturer, Department of Electric Machinery, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Study of harmonic current components in transformer unit with booster transformer

Аннотация

Рассмотрен однофазный режим работы силового трансформатора с вольтодобавочным трансформатором в схеме питания контактной сети переменного тока. В электрической схеме замещения системы питания контактной сети двухпутного участка нагрузкой является электровоз постоянного тока или другие потребители подобного рода, имеющие выпрямительные установки, наличие которых обуславливает появление несимметричных периодических токов как в системе электроснабжения, так и в самом силовом трансформаторе. Приведены формулы для расчета гармонических составляющих в силовом трансформаторе с вольтодобавочным трансформатором.

В статье рассматривается метод гармонического анализа, когда правой частью дифференциальных уравнений являются эквивалентные ЭДС, представленные в виде тригонометрических рядов. Решение дифференциальных уравнений получено непосредственно в виде рядов Фурье. Такой подход существенно упрощает расчет энергетических показателей схемы.

Ключевые слова: силовой трансформатор, гармонические составляющие токов, однофазная несимметричная нагрузка, схема замещения, тригонометрический ряд.

Summary

A single-phase operation of the power transformer unit with booster transformer in the power circuit of AC catenary has been considered. In the electrical equivalent circuit of catenary power system on double-track section, the load is represented by DC locomotive or other consumers of this kind, equipped with rectifier units, the presence of which causes the appearance of asymmetric periodic currents both in the power system, and in the power transformer. The formulas for calculating harmonic components in the power transformer with booster transformer are provided.

The paper addresses the harmonic analysis method, when the right side of the differential equations are equivalent EMFs, presented in the form of trigonometric series. Solution of differential equations is obtained directly in the form of Fourier series. This approach significantly simplifies analysis of energy performance of the circuit.

Keywords: power transformer, harmonics currents, single-phase unbalanced load, equivalent circuit, trigonometric series.

На железных дорогах России, электрифицированных на переменном токе, распространено питание контактной сети с помощью трехфазных трансформаторов, соединенных по схеме $Y/\Delta-11$ (рис. 1) [1].

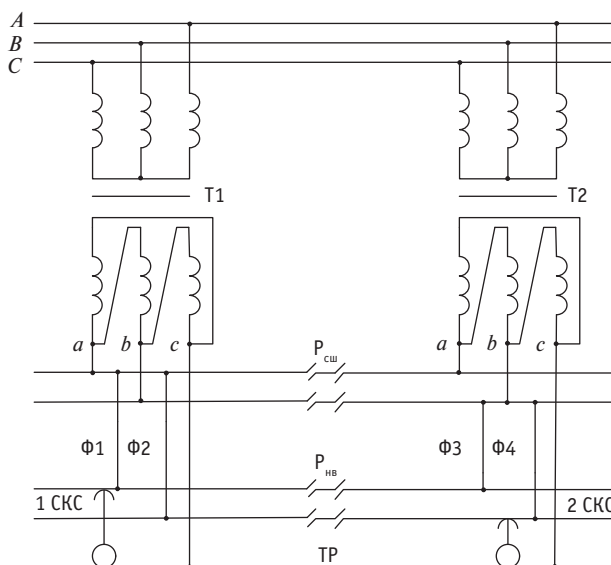


Рис. 1. Схема питания контактной сети двухпутного участка

На тяговой подстанции с двумя силовыми трансформаторами Т1 и Т2 возможны следующие режимы работы трансформаторов и соответственно схемы питания контактной сети.

1. Однофазный режим (независимое питание секций контактной сети), при котором первая секция контактной сети 1СКС питается от фазы a трансформатора Т1, а вторая секция контактной сети 2СКС — от фазы c трансформатора Т2. Разъединители сборных шин $P_{сш}$ и разъединители нейтральной вставки контактной сети $P_{нв}$ отключены.

2. Двухфазный режим (совместное питание секций контактной сети), при котором разъединители $P_{сш}$ включены, а разъединители $P_{нв}$ отключены. Трансформаторы могут работать параллельно или раздельно. При раздельном питании один из трансформаторов питает обе секции контактной сети, а другой отключен и находится в резерве. В обоих случаях (при параллельной или при раздельной работе) в зависимости от поездной ситуации трансформаторы работают в однофазном или двухфазном режимах. Схема совместного питания секций контактной сети в системе тягового электроснабжения переменного тока является основной, применяемой в эксплуатации.

Введение параллельной работы силовых трансформаторов связано с увеличением количества, массы и скорости движения поездов. Но и в этом случае снижение потери напряжения в параллельно работающих трансформаторах тяговой подстанции при повышении токовых нагрузок не компенсирует возросшие потери напряжения в контактной сети.

Мероприятия, направленные на снижение сопротивления контактной подвески, как показывают условия эксплуатации, не обеспечивают необходимого эффекта по повышению напряжения в контактной сети, особенно при возрастающих размерах движения поездов.

В сложившейся ситуации, чтобы регулировать напряжение в контактной сети, следует использовать дополнительное оборудование. Для существующих силовых трансформаторов ТДТНЖУ таким оборудованием являются регулируемые вольтодобавочные трансформаторы ВДТ, образующие совместно с силовым трансформатором вольтодобавочный агрегат ВДА. Для перспективных силовых трансформаторов ТДТНВ вводятся дополнительные регулируемые вольтодобавочные обмотки.

Рассмотрим подключение однофазного ВДТ с двумя вторичными вольтодобавочными обмотками к силовым трансформаторам (рис. 2).

В схеме электроснабжения (см. рис. 2) вольтодобавочный трансформатор представляет собой трехобмоточный трансформатор, первичная обмотка которого подключается к фазе b обмотки 27,5 кВ силового трансформатора, а вторичные обмотки ВДТ включаются соответственно в фазы a и c силового трансформатора.

Исследуем электромагнитные процессы в системе, изображенной на рис. 2, когда силовой трансформатор работает на одну нагрузку (электропоезд только в одной из двух секций контактной сети — 1СКС). Примем следующие допущения:

величина холостого тока составляет $I_0 = (2-8)\% I_{1H}$, поэтому током холостого хода силового, вольтодобавочного и выпрямительного электропоездного трансформатора можно пренебречь;

в исследуемом режиме трансформатор работает при несимметричной нагрузке фаз, электромагнитные процессы в каждой фазе трехфазного трансформатора с соединением обмоток Y/Δ можно рассматривать независимо — как процессы в трех однофазных трансформаторах [2].

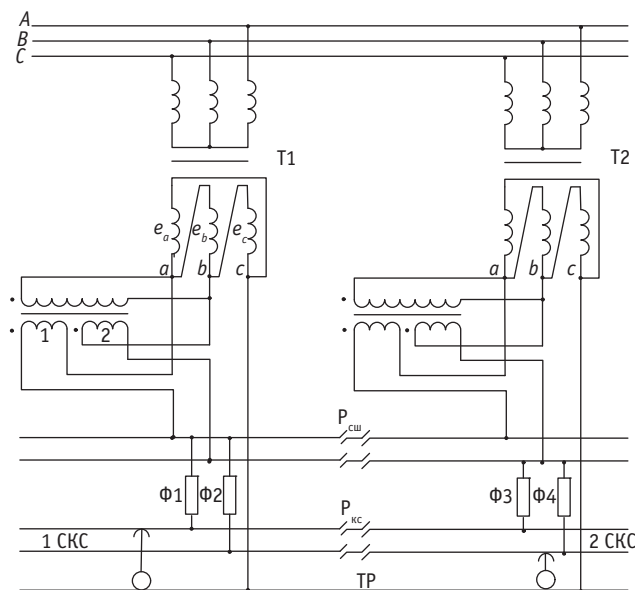


Рис. 2. Схема питания контактной сети двухпутного участка с одним однофазным трехобмоточным ВДТ

Соответственно электрическая схема замещения системы питания контактной сети 1СКС двухпутного участка с одним однофазным трехобмоточным ВДТ при однофазной нагрузке силового трансформатора Т1 будет иметь вид, представленный на рис. 3.

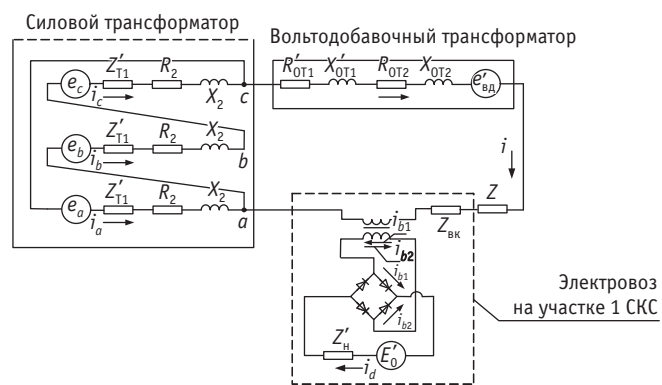


Рис. 3. Электрическая схема замещения системы питания контактной сети двухпутного участка с трехобмоточным вольтодобавочным трансформатором и однофазной тяговой нагрузкой

В схеме замещения приняты следующие обозначения:
 e_a, e_b, e_c — ЭДС вторичных обмоток силового трансформатора;

$e'_{вд}$ — ЭДС приведенной вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора;

Z'_{T1} — полное сопротивление приведенной первичной обмотки силового трансформатора, $Z'_{T1} = Z / k_1^2$, где Z и k_1 — соответственно полное сопротивление первичной обмотки и коэффициент трансформации силового трансформатора;

R_2, X_2 — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки силового трансформатора;

R'_{OT1}, X'_{OT1} — активное и индуктивное сопротивления приведенной первичной обмотки вольтодобавочного трансформатора, $R'_{OT1} = R_{OT1} / k_2^2$, $X'_{OT1} = X_{OT1} / k_2^2$, где k_2 — коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора;

R_{OT2}, X_{OT2} — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора;

Z — полное сопротивление фидера тяговой сети, подключенного к фазе a ;

Z_{BK} — полное сопротивление первичной и приведенной вторичной обмотки выпрямительного трансформатора электровагона;

E'_0 — приведенное значение противо-ЭДС нагрузки, $E'_0 = k_2 \cdot E_0$, где k_2 — коэффициент трансформации выпрямительного трансформатора электровагона;

Z'_H — приведенное полное сопротивление цепи нагрузки, $Z'_H = k_2^2 Z_3$.

В схеме замещения нагрузкой является электровагон постоянного тока с выпрямительной установкой, что обуславливает появление несинусоидальных периодических токов в исследуемой схеме.

Количественный анализ процессов, происходящих в электрической схеме с преобразователем, обычно выполняется кусочно-линейным методом, когда составляются линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами [3]. В статье для расчета электрической схемы замещения применен метод гармонического анализа, когда решение дифференциальных уравнений представлено непосредственно в виде тригонометрических рядов. При использовании данного метода существенно упрощается расчет эксплуатационных характеристик (коэффициентов искажения, пульсации).

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы в схеме замещения, имеют вид:

$$X_3 \frac{di_{B1}}{d\omega t} + r_3 i_{B1} = e_1(\omega t);$$

$$X_3 \frac{di_{B2}}{d\omega t} + R_3 i_{B2} = e_2(\omega t);$$

$$i_d = i_{B1} + i_{B2}; \quad i = i_{B1} - i_{B2};$$

$$i_a = \frac{2i}{3}; \quad i_b = -\frac{1}{3}i + i_1; \quad i_c = -\frac{i}{3},$$

где i_d — выпрямленный ток в силовой цепи электровагона;

i_a, i_b, i_c — фазные токи вторичной обмотки силового трансформатора;

i_1 — ток первичной обмотки вольтодобавочного трансформатора,

$$i_1 = \frac{i}{k_2},$$

где k_2 — коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора;

$e_1(\omega t), e_2(\omega t)$ — эквивалентные ЭДС источника питания (силового и вольтодобавочного трансформаторов) и противо-ЭДС нагрузки (электровагона),

$$e_1(\omega t) = E_a \sin \omega t + E'_{вд} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) - E'_0;$$

$$e_2(\omega t) = - \left[E_a \sin \omega t + E'_{вд} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \right] - E'_0;$$

$$R_3 = R_1 + R_{OT} + R + R_{BK} + R'_H;$$

$R_1 = \frac{2}{3}(R'_{T1} + R_2)$ — эквивалентное активное сопротивление силового трансформатора Т1;

$R_{OT} = R_{OT1} + R'_{OT2}$ — активное сопротивление вольтодобавочного трансформатора;

$R_{BK} = R_{1BK} + R'_{2BK}$ — активное сопротивление выпрямительного трансформатора электровагона;

R'_H — приведенное активное сопротивление нагрузки (электровагона);

$$X_3 = X_1 + X_{OT} + X + X_{BK} + X'_H;$$

$X_1 = \frac{2}{3}(X'_{T1} + X_2)$ — индуктивное сопротивление силового трансформатора Т1;

$X_{OT} = X'_{OT} + X_{OT2}$ — индуктивное сопротивление вольтодобавочного трансформатора;

$X_{BK} = X_{1BK} + X'_{2BK}$ — индуктивное сопротивление выпрямительного трансформатора электровагона;

X — индуктивное сопротивление фидера тяговой сети, подключенного к фазе a ;

X'_H — приведенное индуктивное сопротивление нагрузки (электровагона).

Эквивалентные ЭДС $e_1(\omega t), e_2(\omega t)$ представляют собой периодические функции с периодом 2π .

Временные диаграммы эквивалентных ЭДС и токов i_{B1}, i_{B2} рассматриваемого режима работы (непрерывный выпрямленный ток) представлены на рис. 4.

Пределы существования эквивалентных ЭДС без учета угла коммутации вентилей:

$$e_1(\omega t) = E_a \sin \omega t + E'_{вд} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) - E'_0$$

при $\psi < \omega t < \pi + \psi$;

$$e_2(\omega t) = - \left[E_a \sin \omega t + E'_{вд} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \right] - E'_0$$

при $\psi + \pi < \omega t < 2\pi + \psi$,

где ψ — начальная фаза, определяемая из равенства $E_a \sin \psi = E_0$ (см. рис. 4).

Эквивалентные ЭДС $e_1(\omega t), e_2(\omega t)$ представим в виде тригонометрических соотношений:

$$e_1(\omega t) = \frac{a_{01}}{2} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [a_{1m} \cos m\omega t + b_{1m} \sin m\omega t];$$

$$e_2(\omega t) = \frac{a_{02}}{2} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [a_{2m} \cos m\omega t + b_{2m} \sin m\omega t].$$

При расчете коэффициентов тригонометрических рядов пренебрегаем углом коммутации вентилей выпрямителя нагрузки, тогда коэффициенты a_{01} , a_{02} , a_{1m} , a_{2m} , b_{1m} , b_{2m} — коэффициенты ряда Фурье и могут быть рассчитаны по формулам [4]:

$$a_{01} = a_{02} = \frac{2E_a}{\pi} \cos \psi + \frac{E'_{\text{вд}}}{\pi} (\cos \psi - \sqrt{3} \sin \psi) - E'_0;$$

$$a_{1m} = -a_{2m} = \frac{2E'_0}{m\pi} \sin m\psi \text{ при } m = (1, 3, 5, 7, \dots);$$

$$a_{1m} = a_{2m} = \frac{E_a}{\pi} \left[\frac{\cos(m+1)\psi}{m+1} + \frac{\cos(m-1)\psi}{m-1} \right] + \frac{E_{\text{вд}}}{2\pi} \left[-\frac{\sqrt{3}}{m+1} \sin(m+1)\psi + \frac{1}{m+1} \cos(m+1)\psi - \frac{\sqrt{3}}{m-1} \sin(m-1)\psi + \frac{1}{m-1} \cos(m-1)\psi \right]$$

при $m = (2, 4, 6, \dots)$;

$$b_{11} = -b_{21} = \frac{E_a}{2} - \frac{2E'_0}{\pi} \cos \psi + \frac{E_{\text{вд}}}{4};$$

$$b_{1m} = -b_{2m} = -\frac{2E'_0}{m\pi} \cos m\psi \text{ при } m = (3, 5, 7, \dots);$$

$$b_{1m} = b_{2m} = \frac{E_a}{\pi} \left[-\frac{\sin(m-1)\psi}{m-1} + \frac{\sin(m+1)\psi}{m+1} \right] + \frac{E_{\text{вд}}}{2\pi} \left[\frac{\cos(1-m)\psi}{1-m} - \frac{\sqrt{3}}{1-m} \sin(1-m)\psi + \frac{\sin(1+m)\psi}{1+m} + \frac{\sqrt{3}}{1+m} \cos(1+m)\psi \right]$$

при $m = (2, 4, 6, \dots)$.

Окончательно дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в трансформаторном агрегате с вольтодобавочным трансформатором при однофазном режиме работы силового трансформатора Т1, будут иметь вид:

$$x_3 \frac{di_{\text{в1}}}{d\omega t} + r_3 i_{\text{в1}} = \frac{a_{01}}{2} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [a_{1m} \cos m\omega t + b_{1m} \sin m\omega t];$$

$$x_3 \frac{di_{\text{в2}}}{d\omega t} + r_3 i_{\text{в2}} = \frac{a_{02}}{2} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [a_{2m} \cos m\omega t + b_{2m} \sin m\omega t].$$

Выпрямленный ток силовой цепи нагрузки (электроваза) равен

$$i_d = i_{\text{в1}} + i_{\text{в2}}.$$

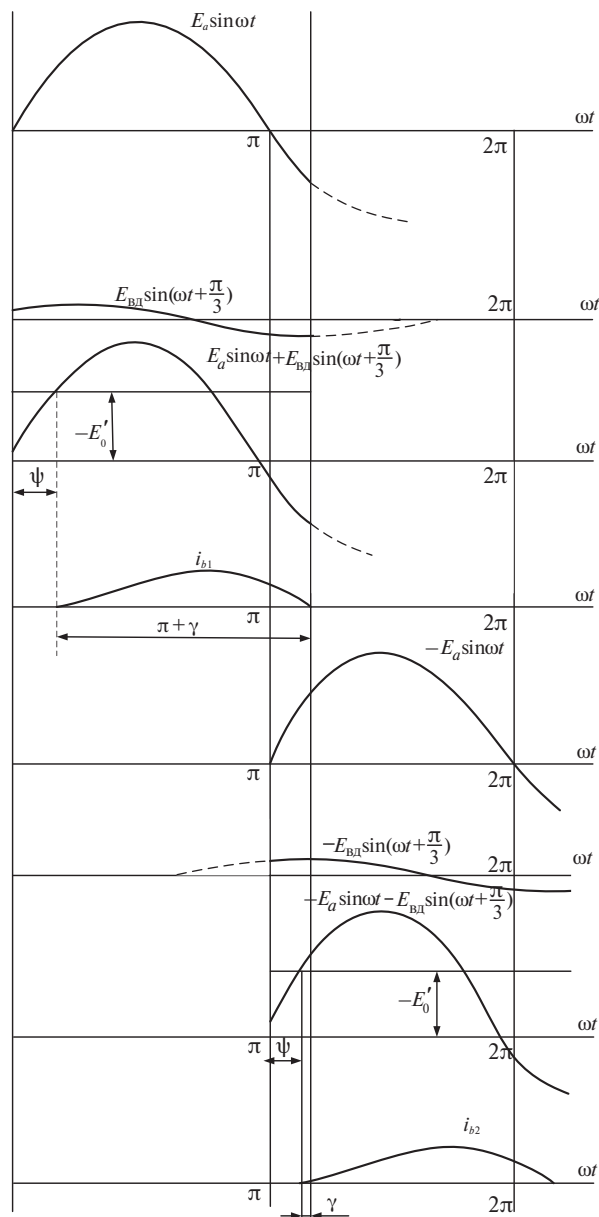


Рис. 4. Временные диаграммы эквивалентных ЭДС и токов с вольтодобавочными трансформаторами

Фазные токи вторичной обмотки силового трансформатора [5]:

$$i = i_{\text{в1}} - i_{\text{в2}}; i_a = \frac{2i}{3}; i_b = -\frac{1}{3}(i + i_1); i_c = -\frac{i}{3},$$

$$\text{где } i_1 = \frac{i}{K_2}.$$

Решение дифференциальных уравнений может быть получено непосредственно в виде тригонометрических рядов:

$$i_{\text{в1}} = I_{10} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [I_{1m} \cos(m\omega t - \psi_{1m}) + I_{1m} \sin(m\omega t - \psi_{1m})];$$

$$i_{b2} = I_{20} + \sum_{m=1,2,3,4,5,\dots}^N [I_{2m} \cos(m\omega t - \psi_{2m}) + I_{2m} \sin(m\omega t - \psi_{2m})],$$

$$\text{где } I_{10} = I_{20} = \frac{a_{01}}{R_3};$$

$$I_{1m} = I_{2m} = \frac{a_{1m}}{\sqrt{R_3^2 + (mX_3)^2}} \text{ при } m = (2, 4, 6, \dots);$$

$$I_{1m} = -I_{2m} = \frac{a_{1m}}{\sqrt{R_3^2 + (mX_3)^2}} \text{ при } m = (1, 2, 3, \dots);$$

$$\psi_{1m} = \psi_{2m} = \arctg \frac{mX_3}{R_3} \text{ при } m = (1, 2, 3, 4, 5, \dots);$$

$$I_{11} = -I_{21} = \frac{b_{11}}{\sqrt{R_3^2 + X_3^2}};$$

$$I_{1m} = I_{2m} = \frac{b_{1m}}{\sqrt{R_3^2 + (mX_3)^2}} \text{ при } m = (2, 4, 6, \dots);$$

$$I_{1m} = -I_{2m} = \frac{b_{1m}}{\sqrt{R_3^2 + (mX_3)^2}} \text{ при } m = (3, 5, 7, \dots);$$

$$\psi_{1m} = \psi_{2m} = \arctg \frac{mX_3}{R_3} \text{ при } m = (1, 2, 3, 4, 5, \dots).$$

Выпрямленный ток силовой цепи нагрузки (электровоза, электросекции и т.п.) равен

$$i_d = 2 \left[I_{10} + \sum_{m=2,4,6,\dots}^N I_{1m} \cos(m\omega t - \psi_{1m}) \right].$$

Ток i (см. рис. 3) и фазные токи вторичных обмоток силового трансформатора Т1 рассчитываются по формулам:

$$i = 2 \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11}) + \sum_{m=3,5,7,\dots}^N I_{1m} \sin(m\omega t - \psi_{1m}) \right\};$$

$$i_a = \frac{4}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11}) + \sum_{m=3,5,7,\dots}^N I_{1m} \sin(m\omega t - \psi_{1m}) \right\};$$

$$i_b = -\frac{2}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11} - 120^\circ) + \sum_{m=3,5,7,\dots}^N I_{1m} \sin[m(\omega t - 120^\circ) - \psi_{1m}] \right\} + \frac{2}{K_2} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11}) + \sum_{m=3,5,7,\dots}^N I_{1m} \sin[m\omega t - \psi_{1m}] \right\};$$

$$i_c = -\frac{2}{3} \left\{ I_{11} \sin(\omega t - \psi_{11} - 240^\circ) + \sum_{m=3,5,7,\dots}^N I_{1m} \sin[m(\omega t - 240^\circ) - \psi_{1m}] \right\}.$$

Полученные расчетные выражения позволяют сделать следующие выводы.

1. Применение вольтодобавочных трансформаторов, подключенных к фазе b силового трансформатора Т1, ведет к увеличению первой и высших нечетных гармоник фазного тока. При повышении напряжения вторичных обмоток ВДТ пропорционально возрастает величина первой и высших гармоник тока фазы b силового трансформатора Т1 [6].

2. Амплитуды первой и высших нечетных гармоник токов i_a, i_b, i_c зависят не только от величины амплитуды фазной ЭДС вторичной обмотки силового трансформатора Т1, вольтодобавочного трансформатора, но и от величины противо-ЭДС нагрузки (электровоз и т.п.).

3. Полученные решения дифференциальных уравнений непосредственно в виде гармонического ряда позволяют достаточно просто рассчитать:

коэффициент искажения, равный отношению действующего значения основной гармоники тока и полного тока первичной обмотки выпрямительного трансформатора электровоза или силового трансформатора Т1;

коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (тока), представляющий собой отношение амплитудного значения m -й гармоники составляющей выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения (тока);

коэффициент мощности силового трансформатора Т1.

Литература

1. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог : учеб. для вузов. М. : Транспорт, 1982. 207 с.
2. Петров Г. Я. Электрические машины : учеб. для вузов. М. : Госэнергоиздат, 1956. 272 с.
3. Коганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи : учеб. для вузов. М. : Госэнергоиздат, 1956. 272 с.
4. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. : АСТ, 2008.
5. Регулируемый трансформаторный агрегат электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Б. А. Аржанников, В. Ф. Григорьев, А. А. Пышкин, В. П. Светоносов // Электрификация и организация скоростных и тяжёловесных коридоров на железнодорожном транспорте : матер. IV междунар. симп. «Элтранс-2007», Санкт-Петербург, 23–26 окт. 2007 г. СПб. : ПГУПС, 2009.
6. Аржанников Б. А., Григорьев В. Ф., Бондаренко А. В. Исследование гармонических составляющих в трансформаторном агрегате электрифицированных железных дорог переменного тока // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 105–108. ISSN 1815-9400.

References

1. Markvardt K. G. Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog : ucheb. dlya vuzov [Electric railways power supply : a textbook for universities]. M. : Transport, 1982. 207 p.
2. Petrov G. Ya. Elektricheskie mashiny : ucheb. dlya vuzov [Electric cars : a textbook for universities]. M. : Gosenergoizdat, 1956. 272 p.
3. Koganov I. L. Elektronnye i ionnye preobrazovateli : ucheb. dlya vuzov [Electronic and ionic converters : a textbook for universities]. M. : Gosenergoizdat, 1956. 272 p.
4. Vygodskiy M. Ya. Spravochnik po vysshey matematike [Handbook on higher mathematics]. M. : AST, 2008.
5. Reguliruemyy transformatornyy agregat elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka 25 kV [Adjustable transformer unit of AC 25 kV electrified railways] / B. A. Arzhannikov, V. F. Grigoryev, A. A. Pyshkin, V. P. Svetonosov // Elektrifikatsiya i organizatsiya skorostnykh i tyazhelovesnykh koridorov na zheleznodorozhnom transporte : mater. IV mezhdunar. simp. «Eltrans-2007», Sankt-Peterburg, 23–26 okt. 2007 g. SPb. : PGUPS, 2009.
6. Arzhannikov B. A., Grigoryev V. F., Bondarenko A. V. Issledovanie garmonicheskikh sostavlyayushchikh v transformatornom agregate elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Study of harmonic components in the transformer unit of electrified AC railways] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 105–108. ISSN 1815-9400.

УДК 621.337.22

Анатолий Яковлевич Калининченко, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Научно-инновационного центра Академии электротехнических наук Российской Федерации (НИЦ АЭН РФ), Москва, Александр Николаевич Грачев, старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Российской академии наук, Москва

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Anatoliy Yakovlevich Kalinichenko, DSc in Engineering, Professor, Deputy Director, Science Innovation Centre of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation (SIC AES Russia), Moscow, Alexander Nikolayevich Grachev, Senior Researcher, Dorodnitsyn Computing Center, Russian Academy of Sciences, Moscow

Rational principles for construction of power structure of hybrid electric transport

Аннотация

Основная тенденция, наметившаяся в последнее время, — использование гибридных систем в силовых установках тягового электропривода и в электротехнических системах. Это оправдано по многим причинам, прежде всего в связи с повышением требований к экологической безопасности. Современные тяговые аккумуляторные батареи позволяют расширить сферу применения автономных источников питания. В статье рассмотрена возможность использования тиристорных преобразователей в гибридном электротранспорте, обосновано рациональное построение структуры силовой схемы исходя из минимальной установленной мощности силовых тиристор.

Ключевые слова: тиристорные преобразователи, тяговая аккумуляторная батарея, тяговые двигатели, силовые тиристоры, диоды, коэффициент использования, коэффициент трансформации, коэффициент заполнения.

Summary

The main trend which has been emerging recently is the use of hybrid systems in electric traction power plants and in electrical systems. This is reasonable for many reasons, primarily due to increased environmental safety requirements. Modern traction batteries allow to extend applicability of independent power supply. The article discusses the possibility of the use of thyristor converters in hybrid electric vehicles, rational structuring of power circuit is justified based on a minimum installed capacity of power thyristors.

Keywords: thyristor converters, traction battery, traction motors, power thyristors, diodes, utilization rate, ratio, the fill factor.

Тенденция к использованию альтернативных источников питания в связи с повышением требований к экологической безопасности и автономности транспортных средств при отсутствии постороннего источника питания для железных дорог — контактной сети предопределяет разработку технических решений, обеспечивающих минимальные оправданные затраты на их реализацию. Бесконтактные методы регулирования тягового усилия путем изменения напряжения на тяговых двигателях, в частности, электроподвижного состава (ЭПС) позволяют значительно улучшить тягово-эксплуатационные показатели, повысить экономическую эффективность электрической тяги и максимально использовать преимущества автономных источников питания, например аккумуляторных батарей (АКБ) [1, 2].

Если в качестве бесконтактного регулятора напряжения применяется тиристорно-импульсный преобразователь (ТИП), то в системе «источник питания — тяговый двигатель» он играет роль трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_0}{U_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где U_0 — напряжение источника питания;

$U_{\text{н}}$ — среднее напряжение на нагрузке (на тяговом двигателе).

$$U_{\text{н}} = U_{\text{д}} \cdot n,$$

где $U_{\text{д}}$ — номинальное напряжение тягового двигателя;

n — количество двигателей, соединенных последовательно.

Коэффициент трансформации тиристорно-импульсного преобразователя должен изменяться в широких пределах в зависимости от напряжения в источнике питания и необходимого напряжения на нагрузке в соответствии с заданным алгоритмом управления движением.

Особенно целесообразно применение тиристорно-импульсных преобразователей на гибридном ЭПС, что позволяет, кроме прочих преимуществ бесконтактного пуска, увеличить время работы в автономном режиме [3, 4].

Общеизвестно, что для обеспечения максимального сцепного веса наиболее благоприятным является параллельное соединение тяговых двигателей, при котором $k_{тр} > 1$. В связи с тем что при расчете параметров ТИП принимается во внимание максимальное напряжение источника питания, то в случае, когда $k_{тр} > 1$, заложенная мощность силовых тириستоров в процессе регулирования напряжения на двигателях будет использоваться не полностью.

Если принять за реализуемую мощность

$$P_n = U_n I_n,$$

где U_n — напряжение на нагрузке;

I_n — ток нагрузки,

а за расчетную мощность силовых полупроводниковых элементов ТИП

$$P_{расч} = U_n I_n,$$

где U_n , I_n — паспортные данные элементов,

то отношение этих величин можно условно назвать коэффициентом использования силовых тириستоров преобразователя, т.е.

$$K_{исп}^T = \frac{U_n I_n}{U_n I_n}. \quad (2)$$

Подставив в (2) значение U_n из (1), получим выражение для коэффициента использования силовых тиристоров:

$$K_{исп}^T = \frac{U_0 I_n}{k_{тр} \cdot U_n \cdot I_n}.$$

Для шунтирующих нагрузку диодов коэффициент использования равен

$$K_{исп}^D = 1 - \frac{U_0 I_n}{k_{тр} \cdot U_n \cdot I_n}.$$

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента использования силовых тиристоров и шунтирующих диодов от коэффициента трансформации в предположении, что мощность, потребляемая двигателями, не изменяется. Как следует из рис. 1, коэффициент использования силовых тиристоров будет максимальным при коэффициенте трансформации, равном единице, т.е. при равенстве напряжения нагрузки напряжению контактной сети (источника питания). Коэффициент использования шунтирующих диодов имеет обратную зависимость. Таким образом, коэффициент использования силовых вентилях находится в зависимости от коэффициента трансформации, т.е. от отношения напряжения питающей сети и напряжения на нагрузке.

Рассмотрим два возможных варианта схемных решений гибридного ЭПС с тиристорно-импульсным регулированием с точки зрения оптимального использования наиболее дорогостоящих элементов — силовых вентилях.

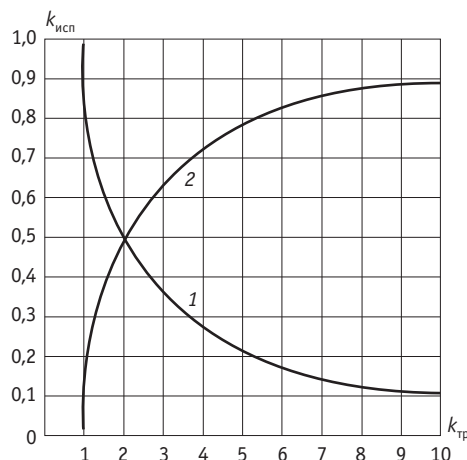


Рис. 1. Диаграмма зависимости коэффициента использования силовых тиристоров (1) и шунтирующих диодов (2) от коэффициента трансформации

Для заряда аккумуляторной батареи на таком ЭПС может применяться схема с отдельным зарядным тиристорно-импульсным преобразователем (ЗП), включенным параллельно с преобразователем, питающим тяговые двигатели (ТД) (рис. 2), или схема с последовательным включением зарядного и тягового преобразователей (рис. 3). При схемном решении, представленном на рис. 2, элементы зарядного преобразователя рассчитываются на напряжение источника питания, однако коэффициент трансформации в этом случае будет больше единицы, так как при существующих типах тяговых аккумуляторных батарей (АБ) практически можно выполнить их максимально на напряжение 1200–1500 В. Следовательно (см. рис. 1), мощность силовых тиристоров зарядного преобразователя при данном решении используется не полностью. То же самое относится и к тяговому преобразователю.

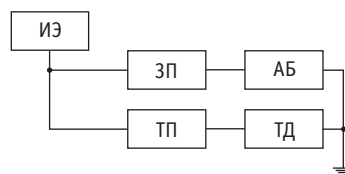


Рис. 2. Блок-схема гибридного ЭПС с параллельным включением зарядного и тягового тиристорно-импульсного преобразователя

Схема, представленная на рис. 3, позволяет более рационально использовать мощность силовых тиристоров преобразователя. Принцип работы гибридного ЭПС при этом решении заключается в том, что с помощью первого тиристорно-импульсного преобразователя осуществляется заряд аккумуляторной батареи, а тяговые двигатели питаются от аккумуляторной батареи при помощи второго (тягового) тиристорно-импульсного преобразователя. ЭДС аккумуляторной батареи должна соответствовать номинальному напряжению двигателей. Это позволяет улучшить коммутационные условия на тяговых двигателях, а также реализовать тяговым преобразователем коэффициент

заполнения, равный единице. При достижении последним значения, равного единице, силовой преобразователь может быть шунтирован. Это рационально с той точки зрения, что постоянная трансформация напряжения в тяговом режиме связана с повышением расчетных нагрузок тиристорного преобразователя и с увеличением в нем потерь по сравнению с кратковременной трансформацией, используемой только в период пуска, так как потери в силовых тиристорах при протекании прямого тока можно представить выражением [4]

$$\Delta P = \Delta U_T \cdot I_{cp} + I_d^2 \cdot R_T,$$

где I_{cp} , I_d — соответственно средний и действующий токи преобразователя;

ΔU_T , R_T — классификационные параметры тиристора.

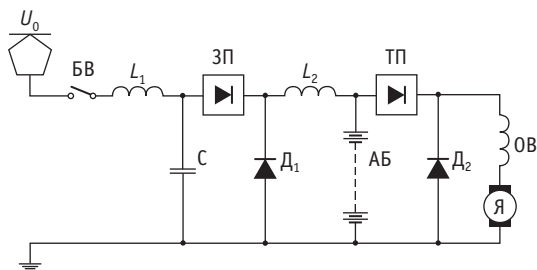


Рис. 3. Блок-схема гибридного ЭПС с последовательным включением зарядного и тягового тиристорно-импульсного преобразователя

Управление работой зарядного преобразователя при данном решении возможно осуществить двумя способами.

1. УПРАВЛЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТРАНСФОРМАЦИИ

При питании от источника напряжением 3000 В коэффициент трансформации зарядного преобразователя имеет значение порядка $k_{тр(зп)} = 2-3$. Расчетный ток силовых тириستоров ЗП в самом неблагоприятном режиме — в предположении, что происходит заряд аккумуляторной батареи и одновременное питание тягового двигателя от сети, будет равен

$$I_{т(зп)} = \frac{I_6}{k_{тр(зп)}} + \frac{I_d}{k_{тр(зп)} \cdot k_{тр(тп)}}.$$

При шунтировании тягового преобразователя $k_{тр(тп)} = 1$, тогда

$$I_{т(зп)} = (I_6 + I_d) \frac{1}{k_{тр(зп)}}. \quad (3)$$

2. УПРАВЛЕНИЕ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

В связи с тем что реализация тяговым двигателем максимального тока носит кратковременный характер, а расчет силовых тириستоров необходимо производить по (3), то, согласно (3), установленная мощность будет недоиспользована.

При управлении зарядным преобразователем по постоянному току установленная мощность силовых вентилях ЗП будет использоваться наиболее полно.

Если контролировать ток, проходящий через зарядный преобразователь от контактной сети,

$$I_{т(зп)} = \frac{I_{д.макс}}{k_{тр(зп)} \cdot k_{тр(тп)}},$$

который при $k_{тр(тп)} = 1$ равен

$$I_{т(зп)} = \frac{I_{д.макс}}{k_{тр(зп)}}, \quad (4)$$

то при $I_d > I_{т(зп)}$ ток двигателя потребляется частично из контактной сети и частично из аккумуляторной батареи, и с учетом (4) ток разряда батареи равен

$$I_6 = I_d - I_{т(зп)} = I_d - \frac{I_{д.макс}}{k_{тр(зп)}}.$$

При $I_d = I_{д.макс}$

$$I_6 = I_d \left(1 - \frac{1}{k_{тр(зп)}} \right).$$

При $I_d < I_{т(зп)}$ происходит заряд аккумуляторной батареи током, т.е.

$$I_6 = I_{т(зп)} - I_d = \frac{I_{д.макс}}{k_{тр(зп)}} - I_d.$$

Для сравнения установленных мощностей силовых тиристоров выполним приближенный расчет. Исходные данные: $U_0 = 3000$ В, $U_d = U_6 = 1000$ В, $I_d = 400$ А, $I_6 = 200$ А. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет установленных мощностей силовых тиристоров

| Установленная мощность силовых тиристоров | При схемном решении (рис. 2) | При управлении с постоянным $k_{тр}$ (рис. 3) | С управлением по постоянному току (рис. 3) |
|---|---|--|---|
| Тяговый преобразователь | $P = U_0 I_d = 3000 \cdot 400 = 1200$ кВт | $P = U_6 I_d = 1000 \cdot 400 = 400$ кВт | $P = U_6 I_d = 1000 \cdot 400 = 400$ кВт |
| Зарядный преобразователь | $P = U_0 I_d = 3000 \cdot 200 = 600$ кВт | $P = U_0 (I_6 + I_d) \frac{1}{k_{тр(зп)}} = 3000(200 + 400) \frac{1}{3} = 600$ кВт | $P = U_0 \frac{I_d}{k_{тр(зп)}} = 3000 \cdot \frac{400}{3} = 400$ кВт |
| Общая максимальная мощность | $P_{общ} = 1800$ кВт | $P_{общ} = 1000$ кВт | $P_{общ} = 800$ кВт |

Как видно из табл. 1, наиболее полное использование силовых тиристорных преобразователей достигается при схемном решении (см. рис. 3) с управлением по постоянному току. Следует отметить, что установленная мощность тиристорных преобразователей при предлагаемом схемном решении и принятых для расчета параметрах

в $m = \frac{1800}{800} = 2,25$ раза меньше, чем при схемном решении,

представленном на рис. 2.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент использования силовых вентилей тяговых тиристорных преобразователей гибридного электрического транспорта находится в зависимости от коэффициента трансформации.

2. Рациональной силовой схемой гибридного транспорта с точки зрения использования установленной мощности тиристорных преобразователей, более простого перехода из одного режима работы в другой, повышения КПД является схема с последовательным соединением зарядного и тягового преобразователей.

Литература

1. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога, Т. П. Долаберидзе. М. : Транспорт, 1970. 420 с.
2. Калиниченко А. Я., Фесечко А. И., Шубин И. Н. Повышение эффективности работы электроподвижного состава с тиристорными импульсными регуляторами // Вестник УрГУПС. 2011. № 2 (10). С. 18–22. ISSN 2079-0392.
3. Калиниченко А. Я., Фесечко А. И. Повышение надежности электронных систем управления ЭПС // Актуальные вопросы образования и науки. 2012. № 1–2. С. 90–93.
4. Калиниченко А. Я., Фесечко А. И. Устойчивость систем автоматического регулирования тока тяговых двигателей постоянного тока // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2009. № 11. С. 146–160.

References

1. Tiristornoe upravlenie elektricheskim podvizhnym sostavom postoyannogo toka [SCR control of DC electric rolling stock] / V. E. Rozenfeld, V. V. Shevchenko, V. A. Mayboga, T. P. Dolaberidze. M. : Transport, 1970. 420 p.
2. Kalinichenko A. Ya., Fesechko A. I., Shubin I. N. Povyshenie effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava s tiristornymi impulsnymi regulyatorami [Improving operational efficiency of electric rolling stock with thyristor switching regulators] // Herald of USURT. 2011. № 2 (10). P. 18–22. ISSN 2079-0392.
3. Kalinichenko A. Ya., Fesechko A. I. Povyshenie nadezhnosti elektronnykh sistem upravleniya EPS [Improving reliability of electronic control systems of electric rolling stock] // Aktualnye voprosy obrazovaniya i nauki. 2012. № 1–2. P. 90–93.
4. Kalinichenko A. Ya., Fesechko A. I. Ustoychivost sistem avtomaticheskogo regulirovaniya toka tyagovykh dvigateley postoyannogo toka [Stability of automatic current control systems of DC traction motors] // Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem. 2009. № 11. P. 146–160.

УДК 621.333.048

Михаил Гелиевич Дурандин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Иван Александрович Кузьминых, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ПАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Mikhail Gelievich Durandin, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Traction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Ivan Alexandrovich Kuzminykh, Assistant Lecturer, Department of Electric Traction, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

Generalized method for calculating the electric and thermal fields in slot insulation of locomotive traction motors

Аннотация

Приведено теоретическое описание математической модели по обобщенному расчету неоднородных и нестационарных электрических и тепловых полей в якорных конструкциях тяговых электродвигателей в среде COMSOL Multiphysics. На примере тягового электродвигателя ТЛ-2К1 показана возможность расчета потенциальных распределений в слоях пазовой изоляции тяговых электродвигателей с учетом теплового фактора при случайном характере режимов работы локомотива.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, высоковольтная изоляция, неоднородное электрическое поле, нестационарное электрическое поле, электрическая напряженность, распределение электрических потенциалов, распределение температурных потенциалов.

Summary

A theoretical description of the mathematical model for generalized analysis of heterogeneous and unstable electric and thermal fields in traction motor armature in COMSOL Multiphysics environment is presented. Based on the example of currently operated traction motor type TL-2K1, a possibility for simultaneous consideration of the thermal factor in analysis of potential loadings in slot insulation layers of traction motors is demonstrated, with account to the random nature of loads and locomotive operation modes.

Keywords: traction motor, high-voltage insulation, non-uniform electric field, transient electric field, electric intensity, distribution of electric potential distribution of temperature potentials.

Безотказная работа изоляционных покрытий силового электромашиного оборудования всегда была в высшей степени актуальной проблемой. В настоящее время ее значимость только возрастает в связи с постоянным ростом рыночной стоимости конструкционных материалов, самих тяговых электродвигателей и, как следствие, себестоимости их восстановительных ремонтов.

Одна из главных задач при проектировании любых видов конструкций — максимально полное использование физических возможностей применяемых материалов для снижения себестоимости и достижения высокого уровня надежности функционирования изделия. Что касается изоляционных покрытий обмоток тяговых электрических машин, то в силу множества нагружающих факторов это требование можно выполнить, если обеспечить стабильность рабочих характеристик по отношению ко всему комплексу воздействующих нагрузок. В свою очередь, перед проектировщиками встает весьма сложная и многовариантная задача — подбор изоляционных композиций с высокой стойкостью не только для ожидаемых рабочих нагрузок, но и для условий их совместного воздействия.

На этот аспект проблемы до сих пор обращали мало внимания, хотя именно от него зависит фактический уровень надежности функционирования изоляционных покрытий. Выполняя свою главную функцию — создание электрического барьера между токоведущими и заземленными частями машины, высоковольтная изоляция одновременно воспринимает значительные механические, влажностные и тепловые нагрузки. Доказано [1], что совместное воздействие рабочих факторов даже умеренного уровня по сравнению с влиянием одного из видов нагружений самой высокой интенсивности в непропорциональной степени ускоряет развитие процессов старения изоляционных покрытий. В большинстве случаев именно этим объясняется существенная разница между прогнозируемыми, полу-

ченными на основе лабораторной статистики, и фактическими сроками службы изоляции.

Применение дорогостоящих изоляционных покрытий с повышенным классом нагревостойкости, что характерно для конструкций новых серий локомотивов, пока не дает ожидаемого экономического эффекта. Скорее всего, это является подтверждением того, что невозможно решить совокупную проблему за счет частных решений в отношении только одной из ее составляющих.

Практическим инструментом в поиске результативных решений может стать разработка универсальной методики совместного расчета слоевых и температурных потенциалов в многослойных изоляционных покрытиях с учетом их взаимного влияния.

До недавнего времени даже задачи по раздельному расчету неоднородных в пространственном распределении и нестационарных по временному характеру поведения электрических и тепловых полей в неоднородных физических средах рассматривались только на постановочном уровне. Это было обусловлено высокой математической сложностью получения решений для системы нелинейных дифференциальных уравнений, что заставляло прибегать к большому числу упрощающих допущений, снижающих достоверность и область практического использования подобных расчетных моделей [2].

Стремительное развитие вычислительной техники и появление высокоэффективных программных продуктов позволяет сегодня уходить от распространенного принципа усредненного представления изоляционного объема в проектировании изоляционных композиций. С помощью современных расчетных сред можно находить пространственные точечные решения для любых полей, в том числе для их совместной совокупности, в максимально полной постановке задач прикладного характера.

При расчете потенциальных нагрузжений изоляционных композиций наиболее трудными для учета факторами являются нестационарный характер поведения корпусного напряжения тяговых машин и пространственная неоднородность распределения электрических потенциалов по элементам изоляционной системы. Для неоднородных диэлектрических сред эта задача усложняется нестационарным характером накопления абсорбционных зарядов в процессе межслоевой поляризации. Разработанная ранее методика расчета электрических полей с учетом перечисленных факторов [3] позволяет не только охарактеризовать общий уровень потенциальной загруженности изоляционной системы, но и определить конкретные элементы и пространственные координаты пиковых потенциальных нагрузок. Результаты исследований [3] выявили две серьезные проблемы изоляционных покрытий в современных тяговых электродвигателях.

Во-первых, полученные распределения электрического поля в пазовой части якорной изоляции доказывают преобладающую зависимость потенциальной загруженности изоляционных слоев от разброса показателей их удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости. Проблема состоит в том, что структурные компоненты пазовой изоляции, представленные в виде разнородных лент межвит-

ковой, корпусной и покровной изоляции, бандажей, прокладок, лаковых и воздушных включений, могут отличаться физическими показателями материалов на порядок. В связи с этим правомерен вопрос о бесконтрольном применении большого числа разнородных материалов в производстве изоляционных покрытий обмоток тяговых электродвигателей, приводящем к значительному разбросу в уровнях их потенциальной загруженности.

С другой стороны, из-за существенных разбросов в распределении потенциальной загруженности компонентов изоляционных покрытий возникает вопрос об их соответствии функциональному назначению и текущему уровню пробивной прочности структурных частей изоляционной системы.

Таким образом, в конструкции изоляционных покрытий современных тяговых электродвигателей особое значение приобретает ярко выраженная нестабильность физических характеристик используемых изоляционных материалов в зависимости от их температурного нагрева (рис. 1 и 2) [4].

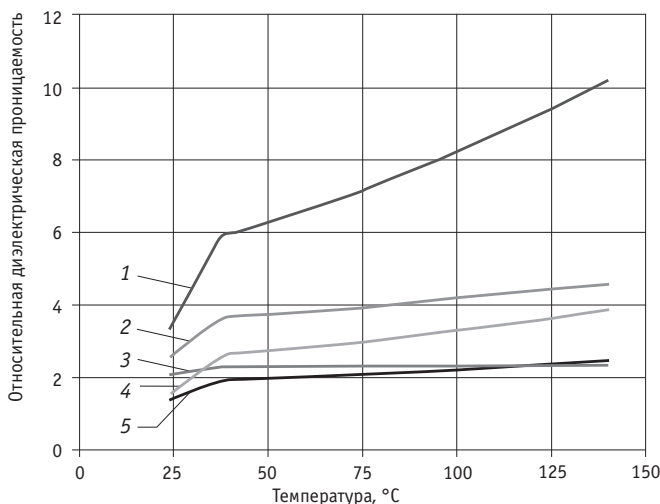


Рис. 1. Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости лент якорной изоляции:
1 — ЛСП-934; 2 — изофлекс; 3 — ПЭТФ; 4 — ЛЭС; 5 — ПЭТВСД

Значимость учета зависимостей $\varepsilon(\tau^\circ)$ и $\lambda(\tau^\circ)$, представленных на рис. 1 и 2, уже была обоснована в исследованиях по распределению электрической напряженности в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов методами компьютерного моделирования [5]. Несмотря на принципиальную возможность расчетов электрических и тепловых полей в единой методике, полученные ранее результаты нельзя считать доказательными в полной мере из-за ограничения на однородный характер тепловых и электрических полей. Применительно к реальным эксплуатационным условиям это допущение не является правомерным, поскольку электромагнитные потери в активных частях машины обуславливают пространственное распределение температурных потенциалов в изоляционном объеме, функционально зависят от целого ряда факторов, а следовательно, требуют специальной методики расчета [6].

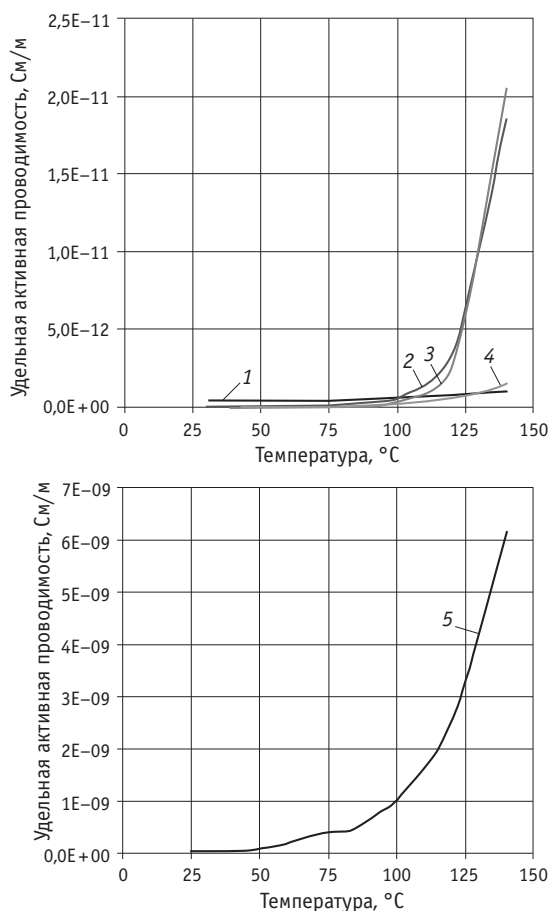


Рис. 2. Температурные зависимости удельных проводимостей лент якорной изоляции:
1 — ПЭТВСД; 2 — ЛСЭП-934; 3 — ПЭТФ; 4 — изофлекс; 5 — ЛЭС

Различная физическая природа рассматриваемых процессов в неоднородной изоляции тяговых электродвигателей предопределяет описание в общем виде взаимосвязанных между собой электрических и тепловых полей системой дифференциальных уравнений теплопроводности и Пуассона [7, 8]:

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = p_v \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\varepsilon} \end{cases}, \quad (1)$$

где ρ , λ , C — соответственно плотность, удельная теплопроводность и удельная теплоемкость материала;

p_v — удельная объемная мощность источника тепла;

ϕ — потенциал;

ρ — объемная плотность заряда;

ε — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Входящее в систему (1) уравнение теплопроводности справедливо для областей, имеющих внутренние источники тепловыделений, определяемых электрическими и магнитными потерями в активных элементах якоря (медные проводники об-

мотки, зубцы и ярмо). При рассмотрении процессов переноса тепла непосредственно в изоляции уравнение (1) в силу пренебрежимо малых значений токов активной проводимости в изоляционных компонентах упрощается путем приравнивания правой части к нулю.

Применительно к внутреннему объему изоляционных слоев уравнение Пуассона также может быть записано в упрощенном виде — через уравнение Лапласа, поскольку источники поляризационных зарядов, учитываемые в правой части, внутри однородных изоляционных слоев отсутствуют.

Таким образом, система уравнений (1) может быть преобразована и записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \rho_m C_m \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_m \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_m \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_m \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = p_m \\ \rho_s C_s \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = p_z \\ \rho_s C_s \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_s \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = p_a \\ \rho_i C_i \frac{\partial \tau}{\partial t} + \lambda_i \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где ρ_m , C_m , λ_m — соответственно плотность, теплоемкость и удельная теплопроводность меди;

ρ_s , C_s , λ_s — соответственно плотность, теплоемкость и удельная теплопроводность стали;

ρ_i , C_i , λ_i — соответственно плотность, теплоемкость и удельная теплопроводность i -го слоя изоляции;

p_m , p_z , p_a — соответственно удельная объемная мощность потерь в меди, в зубцах и в ярме якоря.

Очевидно, что система дифференциальных уравнений (2) нелинейна, поскольку входящие в ее состав параметры энергетических потерь функционально зависят и от времени, и от температуры [6].

Важным для однозначного описания физических процессов является задание граничных условий, которые не только определяют поведение параметров на границах раздела сред, но и увязывают эти поля друг с другом.

Анализ особенностей протекания тепловых процессов в обмотке якоря тягового электродвигателя показывает необходимость введения в расчеты следующих граничных условий:

граничное условие второго рода, применяемое для линий симметрии,

$$n(\lambda \nabla \tau) = 0; \quad (3)$$

граничное условие третьего рода применительно к внешней и внутренней поверхностям якоря и поверхности вентиляционных каналов

$$n(\lambda \nabla \tau) = -h(t)(\tau_{\text{окр}} - \tau); \quad (4)$$

граничное условие четвертого рода, характерное для поверхностей соприкосновения меди и стали якоря с изоляционными компонентами, а также для поверхностей соприкосновения соседних слоев, составляющих изоляционную конструкцию,

$$n(\lambda_1 \nabla \tau) = n(\lambda_2 \nabla \tau), \quad (5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности;
 $h(t)$ — коэффициент теплоотдачи;
 $\tau_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды;
 n — вектор нормали к границе.

Следует отметить, что входящий в выражение (4) коэффициент теплоотдачи h тоже нельзя считать постоянной величиной, так как он функционально зависит от скорости движения локомотива и количества охлаждающего воздуха [9].

Для математического описания потенциальных явлений на границе раздела физически разнородных элементов граничное условие, применяемое к поверхностям соприкосновения изоляционных слоев с заземленными частями машины (зубцы и ядро якоря), будет иметь вид

$$\varphi = 0; \quad (6)$$

граничное условие для поверхностей соприкосновения изоляционных слоев с токоведущими частями машины (медные проводники обмотки якоря)

$$\varphi = U_{\text{корп}}(t); \quad (7)$$

граничное условие, применяемое к линиям симметрии,

$$n(\bar{\delta}) = 0; \quad (8)$$

граничное условие непрерывности вектора полной плотности тока для поверхностей соприкосновения соседних изоляционных слоев

$$n(\bar{\delta}_1) = n(\bar{\delta}_2), \quad (9)$$

где $U_{\text{корп}}(t)$ — корпусное напряжение двигателя в функции времени;

$\bar{\delta}$ — вектор полной плотности тока.

Граничное условие (9), определяющее поведение электрических полей в местах раздела сред с различными физическими параметрами, является, кроме того, связующим с тепловыми полями, это следует из выражения

$$\bar{\delta} = \gamma(\tau) \bar{E} + \varepsilon(\tau) \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \quad (10)$$

где \bar{E} — вектор напряженности электрического поля.

Входящие в выражение (10) показатели удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости среды, как было показано выше, функционально зависят от величины температурных потенциалов.

Единственность решения представленной системы дифференциальных уравнений обеспечивается тем, что задаются не только пространственные граничные условия, но и временные краевые условия, описывающие распределение искомой величины в начальный момент времени [10]. Так, применительно к тепловым полям, где искомая величина — значение температуры в каждой точке пространства, временное краевое условие имеет вид

$$\tau_{t=0} = \tau_0. \quad (11)$$

Для электрических полей, где искомым выступает распределение электрического потенциала в исследуемой области, временное краевое условие задается как

$$\varphi_{t=0} = \varphi_0. \quad (12)$$

Учет геометрических особенностей взаимного пространственного расположения составных элементов якорной конструкции, а также их размеров и формы достигается заданием графической модели исследуемой области. Особенности исполнения вентиляционных систем тяговых электрических машин с обычно применяемыми аксиальными схемами циркуляции охлаждающего воздуха предполагают при тепловых расчетах представление конструкции якоря в виде трехмерной модели. Однако попытки реализовать такую модель в современных программных средах с заданием целесообразной точности расчетов натолкнулись на трудности, связанные с исчерпанием вычислительных возможностей персональных компьютеров. Поэтому в исследованиях рассматривалась двухмерная модель симметрично повторяющегося сегмента якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1 (рис. 3).

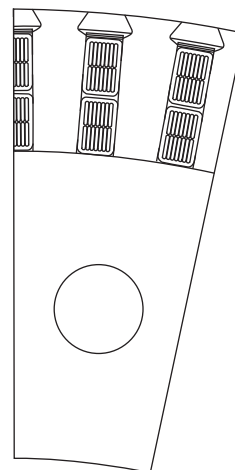


Рис. 3. Геометрия двухмерной модели образующего сегмента якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1

Структура якорной изоляции и заполнения пазов, использованная при компьютерном моделировании тепловых и поляризационных процессов, принималась стандартной и соответствующей

технологии изготовления якорных секций на Екатеринбургском электровозоремонтном заводе. Расчетные значения физических параметров лент определялись по данным рис. 1, 2 и табл. 1, полученным экспериментально [4].

Таблица 1

Тепловые физические характеристики
изоляционных материалов

| Марка образцов изоляции | Толщина, мм | Плотность, кг/м ³ | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) |
|----------------------------|-------------|------------------------------|--|---|
| ПЭТВСД | 0,14 | 2250 | 846 | 0,125 |
| ЛСЭП-934 | 0,02 | 2900 | 864 | 0,100 |
| ПЭТФ | 0,10 | 1350 | 1000 | 0,023 |
| ЛЭС | 0,08 | 2250 | 846 | 0,063 |
| Изофлекс | 0,16 | 1200 | 1692 | 0,307 |

В качестве исходных данных для теплового расчета использованы реальные кривые изменения тока и скорости движения электровоза ВЛ11 с грузовым составом массой 4000 т на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино (рис. 4 и 5) [6].

Значения магнитной индукции в зубцах и ярме якоря в различных временных сечениях определялись в соответствии с кривой тока и по магнитной характеристике тягового электродвигателя ТЛ-2К1.

Начальные значения температуры элементов якоря принимались +20°С, т.е. соответствующими средней летней температуре окружающей среды.

В общем случае величина корпусного напряжения на поверхностях соприкосновения изоляционных слоев с токоведущими частями машины не остается постоянной, а меняется по мере перемещения проводника от одного полюса к другому. Поэтому для проводников нижней секции обмотки задавалось наибольшее значение потенциальной нагрузки, равное 3000 В, а для проводников верхней секции — 1500 В.

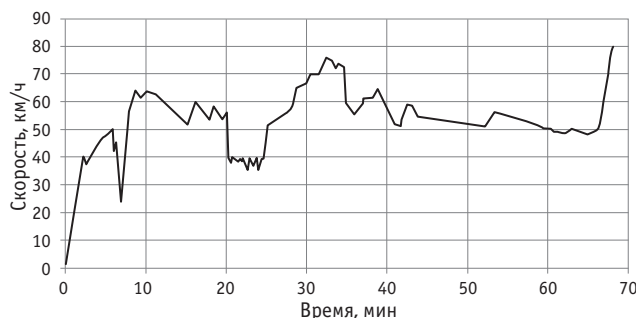


Рис. 4. Кривая скорости электровоза ВЛ11 при движении на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино с составом массой 4000 т

В качестве расчетной использовалась программная среда COMSOL Multiphysics. Временные диаграммы изменения электрической напряженности межвитковой, среднего слоя корпусной и покровной изоляции в области широкой грани про-

водников обмотки якоря тягового электродвигателя ТЛ-2К1 без учета и с учетом распределения температурных потенциалов в пазовой части якорной обмотки представлены на рис. 6 и 7.

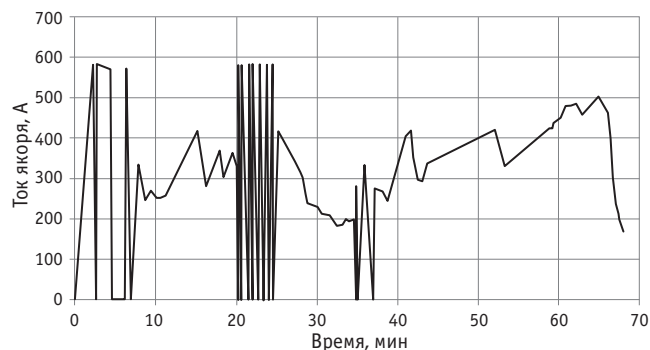


Рис. 5. Кривая тока якоря электровоза ВЛ11 при движении на участке Екатеринбург-Сортировочный — Дружинино с составом массой 4000 т

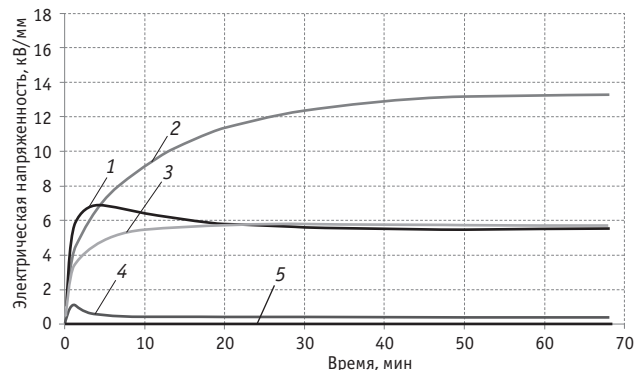


Рис. 6. Временные диаграммы напряженности электрического поля в слоях якорной изоляции двигателя ТЛ-2К1 без учета нагрева: 1 — ПЭТВСД; 2 — ПЭТФ; 3 — изофлекс; 4 — ЛСЭП-934; 5 — ЛЭС

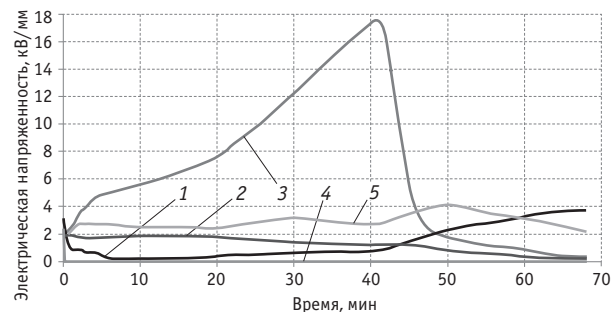


Рис. 7. Временные диаграммы напряженности электрического поля в якорной изоляции обмотки двигателя ТЛ-2К1 с учетом пространственного распределения температурного поля: 1 — ПЭТВСД; 2 — ЛСЭП-934; 3 — ПЭТФ; 4 — ЛЭС; 5 — изофлекс

Полученные зависимости подтверждают значительную неравномерность в потенциальной нагруженности компонентов пазовой изоляции якорной обмотки на протяжении всего периода работы тягового электродвигателя. Характерно, что наиболее низким уровнем потенциальной нагруженности обладают ленты корпусной изоляции (ЛСЭП-934), по замыслу предна-

значенные для создания основного потенциального барьера. При этом уровень потенциальной нагрузки межвитковой изоляции (изоляция провода ПЭТВСД) в определенные моменты может в 8–10 раз превышать загруженность слоев корпусной изоляции паза якоря.

Парадоксальным является и то, что максимальные значения электрической напряженности наблюдаются у лавсановой ленты марки ПЭТФ, играющей роль стягивающего банджа и не предназначенной для выполнения изоляционной функции. Этот факт объясняется низкими значениями удельной активной проводимости полиэтилентерфталата для действующих температур в сравнении с другими материалами.

Тем же фактором объясняется еще большее снижение потенциальной нагрузки у слоев корпусной изоляции (лента ЛСЭП) во второй половине временного интервала, когда температура внутри якорного паза поднимается выше 100°C . Это приводит к резкому росту удельных проводимостей указанных компонентов изоляции (см. рис. 2) и соответственно к новому перераспределению потенциальных нагрузок в неоднородной изоляционной системе. Как видно из сравнения диаграмм, представленных на рис. 6 и 7, учет температурного распределения в пазах якоря изменяет расчетные уровни потенциальной загруженности основных компонентов пазовой изоляции (межвитковой и корпусной) от 2 до 50 раз.

Также была выполнена оценка максимальных уровней воспринимаемых потенциальных нагрузок и координат их расположения в структурных элементах якорной изоляции. Для этого проанализирован характер потенциального распределения в местах пиковых значений напряженности с наибольшей концентрацией силовых линий электрического поля.

Расчеты показали, что в первую очередь к наиболее нагруженным относятся области межвитковой изоляции вблизи скруглений торцов якорных проводников, о чем свидетельствует временной график напряженности электрического поля, полученный с учетом теплового фактора (рис. 8).

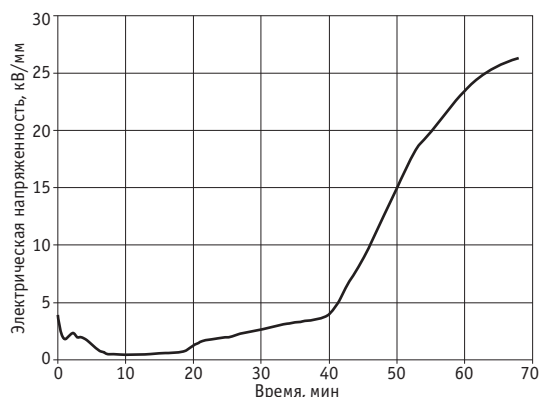


Рис. 8. Временная диаграмма пиковых значений электрической напряженности в межвитковой изоляции якорных проводников тягового электродвигателя ТЛ-2К1

Превышение электрической напряженности в слое межвитковой изоляции величины более 25 кВ/мм уже при рабочих значениях корпусного напряжения подтверждает высокую вероят-

ность возникновения пробоев и частичных разрядов в области скруглений якорных проводников. Можно сказать, что повреждение межвитковой изоляции при действующем характере распределения потенциальных и тепловых нагрузок становится практически достоверным в случае возникновения коммутационных и атмосферных перенапряжений в силовых цепях электровоза.

Ситуация с опасной концентрацией напряженности электрического поля в области межвитковой изоляции для условий предельных температурных нагрузок особенно усугубляется при наличии воздушных включений в пространстве между скруглениями активных проводников обмотки якоря (рис. 9).

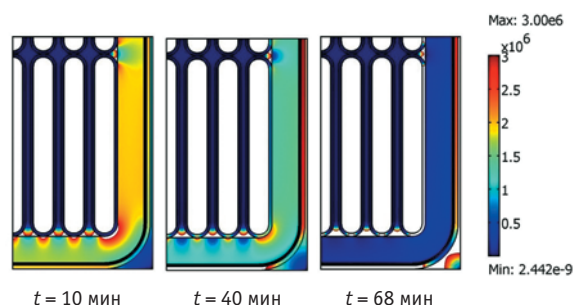


Рис. 9. Распределение электрической напряженности в якорной изоляции двигателя ТЛ-2К1 с воздушными включениями

Области белого цвета на рис. 9 помимо медных проводников указывают на места, где напряженность электрического поля превышает 3 кВ/мм — предел пробивной прочности воздуха. Достижение такой потенциальной загруженности воздушных элементов в изоляционной системе неизбежно приводит к возникновению в них частичных разрядов уже при рабочих уровнях корпусного напряжения. Как известно, длительное воздействие частичных разрядов рассматривается как наиболее агрессивный фактор, способствующий ускоренному разрушению прилегающих слоев межвитковой и корпусной изоляции. Характерно, что с увеличением тепловых нагрузок количество таких областей возрастает.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о чрезвычайно низкой степени использования диэлектрических материалов в изоляционных покрытиях современных тяговых электродвигателей. Функциональное разделение изоляционного объема на межвитковую, корпусную и покровную изоляцию не соответствует фактическому распределению потенциальных нагрузок между ними. Совместный расчет электрических и тепловых полей показал особую значимость учета теплового фактора в распределении потенциальных нагрузок между компонентами якорной изоляции. Разработанная универсальная методика совместного расчета электрических и тепловых полей в многослойных изоляционных покрытиях позволит обоснованно подходить к подбору структуры изоляционных композиций под ожидаемые условия работы тяговых электрических машин уже на стадии их проектирования.

В дальнейшем эту методику предполагается обобщить под расчет любых видов высоковольтной изоляции для всего класса силового электромашиного оборудования.

Литература

1. Вайда Д. Исследование повреждений изоляции : пер. с венг. / Под ред. Д. В. Разеви́га. М. : Энергия, 1968. 400 с.
2. Дурандин М. Г. Расчет электрических полей в изоляционных структурах тяговых электродвигателей локомотивов // Транспорт Урала. 2006. № 1 (8). С. 50–56. ISSN 1815-9400.
3. Дурандин М. Г., Кузьминых И. А. Обоснование методики расчета электрических полей в многослойных изоляционных покрытиях // Транспорт Урала. 2009. № 3 (22). С. 77–81. ISSN 1815-9400.
4. Фролов Н. О. Оптимизация изоляционных структур тяговых электродвигателей локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : УрГУПС, 2004. 167 с.
5. Дурандин М. Г., Кузьминых И. А. Расчет электрических полей в якорной изоляции тяговых электродвигателей локомотивов с учетом теплового фактора // Вестник УрГУПС. 2010. № 4 (8). С. 30–37. ISSN 2079-0392.
6. Дурандин М. Г., Кузьминых И. А. Расчет нестационарных тепловых процессов в якорной изоляции тяговых электродвигателей // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 78–83. ISSN 1815-9400.
7. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
8. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М. : Энергия, 1968. 488 с.
9. Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, М. А. Козорезов, Д. М. Лупкин. М. : Транспорт, 1967. 536 с.
10. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. Л. : Энергия, 1974. 384 с.

References

1. Vayda D. Issledovanie povrezhdeniy izolyatsii : per. s veng. [Study of insulation damage : transl. from hung.] / Pod red. D. V. Razeviga. M. : Energiya, 1968. 400 p.
2. Durandin M. G. Raschet elektricheskikh poley v izolyatsionnykh strukturakh tyagovykh elektrodvigatelye lokomotivov [Analysis of electric fields in insulating structures of locomotive traction motors] // Transport of the Urals. 2006. № 1 (8). P. 50–56. ISSN 1815-9400.
3. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. Obosnovanie metodiki rascheta elektricheskikh poley v mnogosloynnykh izolyatsionnykh pokrytiyakh [Rationale for the procedure of analysis of electric fields in multilayer insulation coatings] // Transport of the Urals. 2009. № 3 (22). P. 77–81. ISSN 1815-9400.
4. Frolov N. O. Optimizatsiya izolyatsionnykh struktur tyagovykh elektrodvigatelye lokomotivov : dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of insulating structures of locomotive traction motors : PhD in Engineering Thesis]. Ekaterinburg : USURT, 2004. 167 p.
5. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. Raschet elektricheskikh poley v yakornoy izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelye lokomotivov s uchedom teplovogo faktora [Analysis of electric fields in armature insulation of locomotive traction motors, taking into account the thermal factor] // Herald of USURT. 2010. № 4 (8). P. 30–37. ISSN 2079-0392.
6. Durandin M. G., Kuzminykh I. A. Raschet nestatsionarnykh teplovykh protsessov v yakornoy izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelye [Analysis of transient thermal processes in armature insulation of traction motors] // Transport of the Urals. 2013. № 1 (36). P. 78–83. ISSN 1815-9400.
7. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha [Heat transfer]. M. : Energoizdat, 1981. 416 p.
8. Govorkov V. A. Elektricheskie i magnitnye polya [Electric and magnetic fields]. M. : Energiya, 1968. 488 p.
9. Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin [Design of traction electric machines] / M. D. Nakhodkin, G. V. Vasilenko, M. A. Kozorezov, D. M. Lupkin. M. : Transport, 1967. 536 p.
10. Filippov I. F. Osnovy teploobmena v elektricheskikh mashinakh [Fundamentals of heat transfer in electrical machines]. L. : Energiya, 1974. 384 p.

УДК 621.332.23

Юрий Валерьевич Могильников, аспирант, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург

ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АППАРАТУРЫ АЛСН

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

Impact of heavy trains on operation of track circuits and continuous automatic locomotive signaling (CALS) equipment

Аннотация

Статья посвящена оценке влияния поперечной асимметрии тягового тока на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН при движении тяжеловесных поездов. Рассмотрена многофакторность воздействия условий эксплуатации на качество работы АЛСН, которая осложняет выявление причин сбоев и разработку действенных мер по полному устранению или снижению мешающего влияния этих причин. Отмечено, что действующие нормы рассчитаны для низких абсолютных значений асимметрии тягового тока, однако с интенсивным движением тяжеловесных поездов эти значения резко возросли, следовательно, требуется разработка новых нормирующих значений.

Ключевые слова: тяжеловесные поезда, асимметрия тягового тока, коэффициент трансформации, рельсовая цепь, дроссель-трансформатор.

Summary

The article evaluates the influence of transverse asymmetry of traction current on operation of track circuits and CALS equipment in the context of traffic of heavy train. Multifactorial effects of operating conditions on the performance of CALS are analyzed, which complicate identification of the causes of failures and development of effective measures to fully eliminate or to reduce the interfering effect of these causes. It is noted that the current standards have been designed for low absolute values of traction current asymmetry, but in view of increased traffic of heavy trains, these values have grown dramatically, therefore, the development of new normalizing values is required.

Keywords: heavy trains, traction current asymmetry, transformation ratio, track circuit, choke transformer.

На электрифицированных участках железных дорог по мере повышения интенсивности движения и роста веса поездов значительно осложняется электромагнитная обстановка для аппаратуры АЛСН и каналов АЛС в аппаратуре КЛУБ. Возрастают тяговые токи в обратной рельсовой цепи, наблюдается искажение их синусоидальности. Интенсификация капитального ремонта пути приводит к тому, что на устойчивости работы АЛСН все заметнее сказывается неравномерность намагничивания по длине рельсов, уложенных в путь. В результате количество сбоев АЛСН возрастает, что отрицательно влияет на безопасность движения поездов. Из-за неплановых остановок и задержек подвижного состава, вызванных отцепками локомотивов с неисправными приборами безопасности, увеличиваются потери в поездной работе, повышается психофизиологическая нагрузка на машинистов. Все это ведет к росту эксплуатационных расходов на поиск и устранение причин сбоев.

Цель статьи заключается в оценке влияния тяжеловесных поездов на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН.

К числу основных факторов, мешающих работе каналов АЛСН, можно отнести следующие: состояние элементов обратной рельсовой тяговой сети и особенности ее построения, величину тягового тока в рельсах под приемными локомотивными катушками АЛСН и его гармонический состав, качество регулировки локомотивной аппаратуры АЛСН и кодового тока в рельсах, режимы работы тяговых двигателей электровоза.

Электромагнитная обстановка особенно сложна на линиях переменного тока [1]. В летнее время переменный тяговый ток настолько активно стекает в землю, что практически отсутствует в рельсах на расстоянии 2–3 км от электровоза. В результате при движении электровоза на расстоянии 3–4 км от тяговой подстанции и далее на АЛСН влияет только ток локомотива в рельсах.

Зимой (а на участках с электротягой постоянного тока — в любое время года) на локомотивные устройства АЛСН влияют также тяговые токи в рельсах от других электровозов, находящихся в межподстанционной зоне [2]. Это воздействие усиливается возле тяговых подстанций, где тяговые токи возвращаются

в рельсы из земли. Длина плеч этих зон составляет 10–15% от расстояния между подстанциями.

Тяговый ток электровоза растекается по рельсовым нитям обратно пропорционально величине их входных сопротивлений. Входные сопротивления, в свою очередь, зависят от продольного сопротивления рельсовых нитей, включающего в себя сопротивления рельсов и сопротивления токопроводящих стыков (продольная асимметрия), а также от сопротивления каждой рельсовой нити по отношению к земле (поперечная асимметрия). Токопроводящие стыки не должны повышать сопротивление рельсовых нитей более чем на 20%. Это достигается за счет соответствующего содержания рельсовых накладок и приварных стыковых соединителей. Неодинаковое увеличение продольного сопротивления рельсовых нитей приводит к неодинаковому распределению тягового тока электровоза под катушками АЛСН и, как следствие, к росту помех этого тока. По этой причине происходит от 6 до 10% всех сбоев АЛСН.

Асимметрия сопротивлений рельсовых нитей по отношению к земле появляется там, где опоры контактной сети и другие конструкции заземляются на рельсы. Входное сопротивление со стороны рельсов у таких заземлителей для сигнального тока должно быть по требованиям контрольного режима рельсовых цепей не меньше 100 Ом. Обеспечивается это установкой специальных защитных устройств (искровых промежутков, полупроводниковых диодов и т.п.). В настоящее время нормы для входных сопротивлений по тяговому току отсутствуют [3].

Измерения сопротивлений цепей индивидуального или группового заземления опор контактной сети постоянного тока в соответствии с действующими нормативами должны проводиться в зависимости от качества изоляции и надежности один раз в 3 или 6 лет в анодных и знакопеременных зонах и один раз в 6 или 12 лет — в катодных зонах. На линиях переменного тока подобные измерения выполняют только выборочно один раз в 9 лет в местах с агрессивными грунтами по отношению к бетону [3]. Таким образом, искровые промежутки на участках переменного тока фактически должны работать до отказов, которые контролируются косвенно — по росту интенсивности сбоев АЛСН в местах установки искровых промежутков. Однако, поскольку на устойчивость работы АЛСН влияет около 30 факторов, рост интенсивности сбоев далеко не всегда связывают с пробоем этих защитных устройств.

Влияние поперечной асимметрии рельсовой линии на устойчивость работы АЛСН можно показать на следующем примере. На рис. 1 [4] приведены результаты измерений тяговых токов в рельсовой линии в летний период на одном из горных участков Транссибирской магистрали, электрифицированном на переменном токе.

Верхняя кривая — это график изменения тягового тока в секциях основной обмотки дроссель-трансформатора, установленного около сигнальной точки кодовой автоблокировки. Нижняя кривая — соответствующее изменение асимметрии тягового тока в этих секциях. По мере приближения к точке измерения тяговый ток в рельсовой линии растет, так как при этом меньше сказывается его утечка из рельсов в землю.

На нижней кривой показаны выбросы величины асимметрии тягового тока по мере движения поезда, причем два из этих вы-

бросов привели к сбоям в работе АЛСН. При первом по ходу выбросе вместо зеленого огня на локомотивном светофоре загорелся белый, а при втором выбросе белый огонь загорелся вместо желтого. Такие выбросы асимметрии тягового тока могут возникать только при прохождении головного локомотива мимо точки рельсовой линии с большой локальной асимметрией ее сопротивления (обычно в местах подключения к рельсам цепей заземления различных конструкций с заниженным входным сопротивлением).

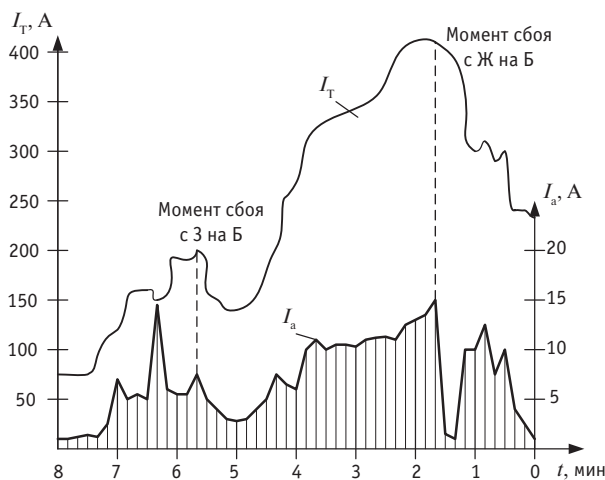


Рис. 1. Поперечная асимметрия рельсовой линии [4]

Повышенный уровень помех может быть вызван и неодинаковой напряженностью магнитного поля по длине рельсовой линии. Основная причина этого — разнополюсная неравномерная намагниченность по длине рельсов, уложенных в путь, а также рельсов, подготовленных для укладки или замененных для размещения внутри колеи или на концах шпал. Существенным может быть и мешающее влияние двоярных рельсовых подкладок, используемых для усиления пути в кривых малого радиуса.

Еще в 1960-х гг. специалистами ВНИИЖТ было предложено устранять неравномерную намагниченность рельсов, уложенных в путь, с помощью электромагнитов вагона-дефектоскопа, следующего по участку со скоростью не более 15 км/ч. В настоящее время для этого используют и другие мобильные средства с электромагнитами. Например, весьма эффективны стационарные установки в рельсосварочных поездах для устранения неравномерной намагниченности рельсов перед укладкой их в путь. Однако до сих пор не разработаны нормы на предельно допустимую неравномерность напряженности магнитного поля рельсовой линии, когда эта неравномерность не создает заметных помех в локомотивном канале АЛСН.

Насколько существенно влияние состояния обратной тяговой рельсовой сети на устойчивость работы устройств АЛСН, иллюстрирует следующий пример. На рис. 2 [3] показано относительное распределение количества сбоев АЛСН, зафиксированных в 2007 г. на первом пути перегона Тельма — Китой Восточно-Сибирской железной дороги, отличавшегося повышенной интенсивностью сбоев. Видно, что на один из километров перегона пришлось больше четверти всех сбоев АЛСН.

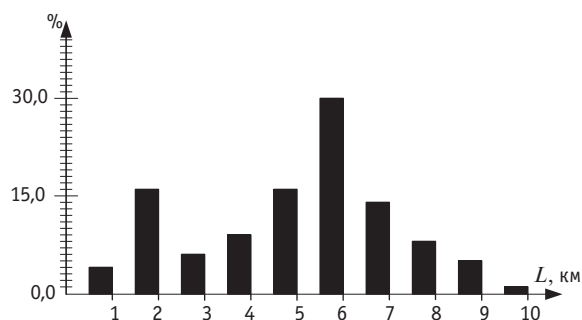


Рис. 2. Количество сбоев АЛСН [3]

Сложнее влияние на АЛСН тяговых токов, протекающих по станционным путям, где обратная рельсовая сеть представляет собой разветвленную электрическую цепь. Схема растекания тягового тока по рельсовой сети станции строится так, чтобы были исключены подпитки путевых приемников от питающих концов других рельсовых цепей. Эти требования не всегда согласуются с требованиями снижения влияния тягового тока в рельсах на устройства АЛСН, особенно на промежуточных станциях.

При одинаковом соотношении входных сопротивлений рельсовых нитей под приемными катушками АЛСН уровень помех в них прямо пропорционален величине собственного тягового тока электроваза и токов других локомотивов, текущих по этим нитям. Согласно действующим нормам, допускаемая асимметрия переменного тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛСН и в местах подключения к рельсам аппаратуры рельсовых цепей составляет 4 % от тягового тока в рельсовой линии [5]. Следует отметить, что эти нормы разрабатывались для максимальной величины тока 300 А. Однако, как показали измерения [3], при движении тяжеловесных поездов по горным участкам значение тягового тока промышленной частоты в рельсовых линиях может достигать 1000 А. То есть в этой части нормы устарели.

Поскольку любые аналоговые фильтры, в том числе и локомотивные фильтры АЛСН, только ослабляют в определенной степени, но не подавляют полностью гармонические составляющие помех, состав гармоник в тяговом токе также влияет на количество сбоев АЛСН. На рис. 3 [3] показан гармонический состав тягового тока в рельсах под катушками АЛСН, полученный по результатам спектрального анализа результатов записей цифровым запоминающим осциллографом.

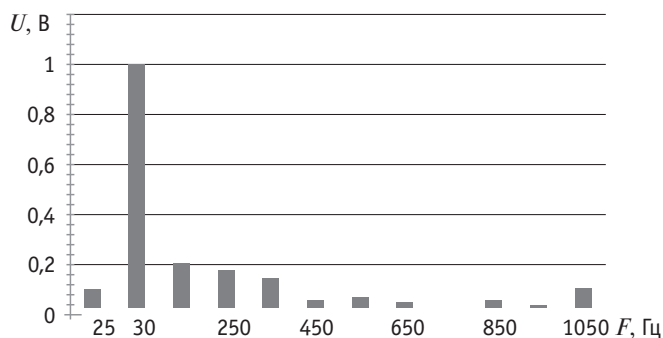


Рис. 3. Гармонический состав тягового тока

В данном случае поезд весом 5959 т с локомотивом серии ВЛ80ТК двигался по горному участку при тяговом токе электроваза 800 А. Как видно из рис. 3, с ростом частоты гармоники тягового тока ее амплитуда уменьшалась. Но с увеличением частоты тока в рельсах напряжение помех, наводимых им в приемных локомотивных катушках АЛСН, росло пропорционально частоте. То есть действие высших гармоник тягового тока на устойчивость работы АЛСН оказывается определяющим [5].

Устойчивость работы АЛС зависит от соотношения уровней сигнала и помех на входе в локомотивную аппаратуру. Поэтому минимально допускаемая величина сигнального тока АЛСН в рельсах под приемными катушками нормируется. А поскольку сигнал кодирован, то степень искажения длительности импульсов и интервалов сигнала передающей аппаратурой также имеет определенные допустимые пределы. Однако реально эти требования выполняются не всегда. В результате до 8–10 % сбоев АЛСН, принимаемых к учету службой автоматики и телемеханики, происходит из-за недостаточной величины кодового тока, а до 15 % и более — из-за нарушения временных характеристик кода.

Основные причины снижения кодового тока АЛСН в рельсах — это снижение сопротивления электрической изоляции рельсовой линии или пробой изоляции железобетонных шпал. Искажения длительности импульсов и интервалов кодовых комбинаций могут происходить из-за неправильной регулировки временных параметров транзитных реле после замены или изменения напряжения питания на их обмотках.

На неисправность локомотивной аппаратуры может приходиться до 3,0–3,5 % сбоев АЛСН. Качество регулировки этой аппаратуры тоже не всегда отвечает предъявляемым требованиям. Например, измерения при движении тяжеловесных поездов показали, что в локомотивной аппаратуре АЛСН встречались фильтры типа ФЛ-25/75, ослабляющие основную помеху на частоте 50 Гц в десятки раз меньше, чем требуется по паспортным данным.

На устойчивость работы АЛСН в значительной степени влияет и электромагнитная обстановка на локомотиве. Это подтверждают результаты анализа статистики за 2007 г. по сбоям и условиям их возникновения на наиболее неблагоприятных по устойчивости работы аппаратуры АЛСН и КЛУБ перегонах главного хода Восточно-Сибирской железной дороги. Для анализа использовались данные из ГИД «Урал», АСУ-БСК и АСУ-Ш2. На рис. 4 [3] показано распределение среднего количества сбоев на 1000 км пробега электровазов тех серий, которые обращались по этим перегонам.

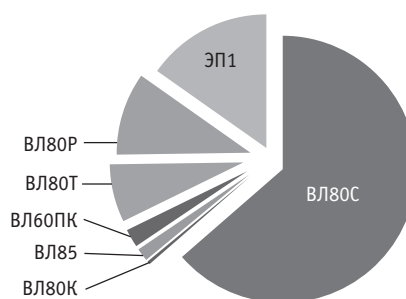


Рис. 4. Количество сбоев АЛСН на 1000 км пробега [3]

Наибольшее удельное количество сбоев по пробегу пришлось на электровазы ВЛ80С, хотя их было всего 12 и обра- щались они в основном с тяжеловесными поездами на горном участке Горхон — Киж, т.е. в самых сложных условиях.

В грузовом движении на рассматриваемых перегонах чаще всего использовались электровазы ВЛ85 и ВЛ80Р. Среднее соотношение поездов с этими электровазами на равнинных участ- ках составляло 1,6:1, на горных — 2,7:1. Согласно статистике, удельное количество сбоев на 1000 км пробега у электровазов ВЛ80Р было в 1,52 раза ниже, чем у ЭП1, при этом у электрова- зов ВЛ85 — в 6,4 раза ниже, чем у ВЛ80Р.

Анализ удельного количества сбоев АЛСН на 100 млн т/км дает другую картину. Как видно из рис. 5 [3], худшими по это- му показателю были электровазы ЭП1 [5].

Из грузовых электровазов наибольшее количество сбоев пришлось на ВЛ60ПК, но они использовались главным обра- зом с рельсосмазывателями на горном участке Большом Луг — Слюдянка-2. В первую очередь причина неудовлетворительной работы АЛСН на этих электровазах — недостаточное внимание к регулировке локомотивной аппаратуры.

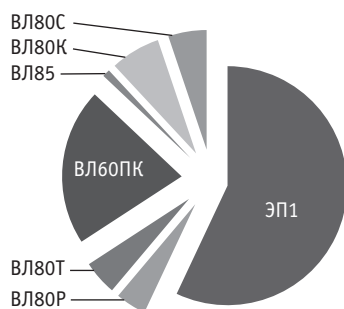


Рис. 5. Диаграмма сбоев АЛСН у разных типов локомотивов на 100 млн т/км

В грузовом движении основная часть перевозок осущест- влялась электровазами серий ВЛ85 и ВЛ80 (соответственно 54,8 и 28,9%). По ним был проведен более тщательный анализ статистических данных (табл. 1) [3].

Как видно из табл. 1, в нечетном направлении анализируе- мый показатель был в среднем в 2 раза выше, чем в четном. Наиболее сильной такая зависимость была у электровазов серии ВЛ85. Объясняется это тем, что на рассматриваемых перегонах среднее соотношение количества поездов весом более 3000 т в четном и нечетном направлениях было равным 3,8:1,0, при- чем 60–65% перевозок осуществлялось электровазами ВЛ85. Поездов весом более 5000 т в четном направлении было в 50 раз больше, и вождение 87% из них также выполнялось элек- тровазами ВЛ85. Следовательно, основные причины характе- ра данной зависимости — увеличение веса поезда и соответ- ствующий рост тягового тока электроваза.

Таким образом, анализ проблем, связанных с пропуском тя- желовесных поездов, показал следующее.

1. Многофакторность воздействия условий эксплуатации на качество работы АЛСН осложняет выявление причин сбо- ев и разработку действенных мер по полному устранению или уменьшению мешающего влияния этих причин.

2. Воздействие тягового тока и его гармонических состав- ляющих на устройства СЦБ зависит не только от значений ко- эффициента асимметрии рельсовой линии, но и от уровня об- ратного тягового тока, протекающего по рельсам, и абсолютно- го значения разностного тока.

3. Нормируемые значения разностного тока и коэффици- ента асимметрии не соответствуют максимально возможным значениям обратного тягового тока в условиях эксплуатации.

4. При большом сопротивлении балласта воздействие гар- монических составляющих на устройства СЦБ может суще- ственно возрасти из-за увеличения поперечной асимметрии.

Таблица 1

Распределение интенсивности сбоев АЛСН по сериям грузовых электровазов с учетом веса поезда на равнинном участке [3]

| Серия локомотива | Направление движения | Среднее количество сбоев в месяц на 1000 км пробега при весе поезда, т | | | | | | | Среднее по сериям электровазов |
|--------------------|----------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------------|
| | | до 1 | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | 5–6 | 6–7 | |
| ВЛ80Р | Четное | — | 0,6 | 3,4 | 0,7 | 0,9 | 1,2 | — | 1,2 |
| | Нечетное | — | 0,5 | 0,5 | 0,8 | — | — | — | 0,5 |
| ВЛ85 | Четное | — | — | — | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,9 | 0,6 |
| | Нечетное | — | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | — | — | 0,2 |
| ВЛ80Т | Четное | 0,6 | 2,3 | 0,5 | 0,9 | — | — | — | 0,9 |
| | Нечетное | 1,6 | 1,2 | — | — | — | — | — | 0,9 |
| Среднее по участку | Четное | 0,5 | 1,0 | 1,8 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0,8 |
| | Нечетное | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | — | — | 0,4 |

Литература

1. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. М. : Транспорт, 1990. 295 с.
2. Шаманов В. И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Иркутск : ИргУПС, 2005. 236 с.
3. Шаманов В. И., Пулятков А. В., Трофимов Ю. А. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛС // Железнодорожный транспорт. 2007. № 4. С. 43–46. ISSN 0044-4448.
4. Поплаухин Э. Н., Ожиганов Н. В. Пособие по ознакомлению с основными принципами работы и системами электроснабжения устройств СЦБ / Дорожная электротехническая лаборатория СКЖД. Ростов н/Д., 2001.
5. Шаманов В. И., Трофимов Ю. А. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 11. С. 37–39.

References

1. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M. Relsovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Track circuits. Analysis of operation and maintenance]. M. : Transport, 1990. 295 p.
2. Shamanov V. I. Pomekhi i pomekhoustoychivost avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii : ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp. [Interference and interference resistance of automatic locomotive signaling : a textbook for railwas universities]. Irkutsk : IrGUPS, 2005. 236 p.
3. Shamanov V. I., Pulytkov A. V., Trofimov Yu. A. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na ustoychivost raboty ALS [Effect of operating conditions on ALS stability] // Zheleznodorozhniy transport. 2007. № 4. P. 43–46. ISSN 0044-4448.
4. Poplaukhin E. N., Ozhiganov N. V. Posobie po oznakomleniyu s osnovnymi printsipami raboty i sistemami elektrosnabzheniya ustroystv STSB [Handbook on basic operation principles and power supply systems of signaling equipment] / Dorozhnaya elektrotekhnicheskaya laboratoriya SKZHD. Rostov on/D., 2001.
5. Shamanov V. I., Trofimov Yu. A. Asimmetriya tyagovykh tokov pod katushkami ALS [Asymmetry of traction currents under ALS coils] // Avtomatika, svyaz, informatika. 2008. № 11. P. 37–39.

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

№ 2 (41), 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,

тел. (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

(департамент международных связей УрГУПС), тел. (343) 221-24-86

Автор фотографии на обложке:

Наталья Викторовна Ладейщикова

С 1 января 2007 г. журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Подписано в печать 24.06.14

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